



Amaury Joel Gadanho da Silva **Desenvolvimento de um programa em C# para cálculo de estruturas em madeira**



Amaury Joel Gadanho da Silva Desenvolvimento de um programa em c# para cálculo de estruturas em madeira

Relatório apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Paulo Cachim, Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

“The world is a dangerous place to live; not because of the people who are evil, but because of the people who don’t do anything about it.”

(Albert Einstein)

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão
Professor associado da Faculdade de Ciências e tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor associado com agregação, Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

Por fim a terminar o meu percurso académico quero deixar uma palavra de apreço e de estima a todas as pessoas que contribuíram para que este dia fosse possível não só diretamente na realização da dissertação, mas também aos que ao longo destes anos criaram condições que me permitiram concluir.

Ao meu Orientador Dr. Paulo Cachim que teve um papel preponderante na decisão de escolher esta dissertação, queria expressar o meu agradecimento por toda a disponibilidade e orientação que me forneceu nos momentos de maiores dúvidas em relação a linha a tomar na dissertação.

Queria agradecer aos meus amigos André Casal, Nicolau Lavres, Vitor Solarelo e Eurico Correia o facto de me terem fornecido material indispensável para o estudo da programação em C#, pois foi o grande desafio desta dissertação, e também devido a não ter nenhuma base de programação esta ajuda tornou-se imprescindível. Estou imensamente grato pela assistência.

Aos meus colegas de curso e amigos queria deixar um agradecimento pelos bons momentos e de amizade no decurso dos anos académicos. Em especial ao Mario Henriques, Júlio de Carvalho, André Pinto, Paulo Pinho, Maria João, Geminiano, Pedro Costa, Venceslau Silva, kylw, Marina Jovanovic, Karolina, Martina, Ivana, Sonja, Alireza, Jelena, Pedro Cenoura, Joel Castanheira, Carla Silva, Elder Hernandez, João Oliveira, Nandinho, João Coelho, Mónica Martins, Marina Stanic, João Alves, Elbênia, Graça Rodrigues, entre outros.

A minha namorada Ana Teixeira quero agradecer todo apoio incondicional, atenção e amor que sempre demonstrou.

Por fim queria deixar o meu mais profundo sentimento de gratidão pelas pessoas que mais me influenciaram e orientaram tanto no percurso académico assim como na vida, minha mãe Maria Gadanho ao Vaz, a minha madrinha Alzira e o seu marido Vitor, a Ana Ferraz, e a Ana Paula. Quero deixar bem claro que sem o vosso apoio não teria sido sucedido.

Bem hajam!

palavras-chave

Programação em C#; Programação em Csharp; Programação em SQL; Estruturas em madeira; XDtimber; Dimensionamento de estruturas em madeira; Verificação à segurança de estruturas em madeira; Propriedades da madeira.

resumo

Na presente dissertação pretende-se que seja desenvolvido um programa informático “XDTimber” no qual possam ser realizados dimensionamentos e verificações de segurança de estruturas constituídas por elementos em madeira, ao abrigo das normas atuais, nomeadamente o Eurocódigo 5. O XDTimber é um programa que pretende ser expedito, fácil e de intuitiva utilização assim como de um agradável aspeto visual.

O programa desenvolvido em linguagem c#, possibilita um conjunto de *inputs*, tais como as dimensões do elemento tipo de madeira assim como as suas características mais relevantes para o cálculo desejado pelo projetista, e ira fornecer a informação relativamente a segurança do elemento como *outputs* e uma folha resumo dos cálculos efetuados em PDF

keywords

Programming in C#; Programming in Csharp; Programming in SQL; Wooden structures; XDTimber; Wooden structures dimensioning; Security check; Wood properties.

abstract

The purpose of this dissertation is the development of a computer programme, named "XDTimber", which performs safety check of timber structures, according to the specification of the European norms, mainly Eurocode 5. XDTimber is a program conceived to be easy and of an intuitive usage as well with a nice visual appearance. The program developed in C# language, enables a set of inputs such as the timber type, dimensions of the element, and also the most relevant characteristics desired needed for the calculation. The program will be able also to provide a sheet summarizing the calculations results in a PDF.

Índice

Índice.....	xvii
Índice de Figuras	xxiii
Índice de Tabelas.....	xxix
Simbologia.....	xxx
1. Introdução	1
1.1. Aspeto geral.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estado limite último.....	3
1.4. Bases para o projeto	3
2. Programação	3
2.1. Visual Studio c#.....	3
2.1.1. Descrição do software.....	3
2.1.2. Criação do projeto.....	3
2.1.3. Elementos de programação	4
2.1.4. Operadores	4
2.1.4.1. Operadores aritméticos	4
2.1.4.2. Operadores relacionais.....	5
2.1.5. Estruturas de controlo	6
2.1.5.1. Estruturas de decisão.....	6
2.1.5.2. Funções intrínsecas.....	7
2.1.6. Windows form.....	8
2.1.6.1. Toolbox (caixa de ferramentas)	9
2.1.6.2. Common controls	10
2.2. SQL server	12
2.2.1. Criação de base de dados.....	12
Nome	xvii

3.	Resistências de cálculo	17
3.1.	Valor de Cálculo das resistências	17
3.1.1.1.	Coeficientes parciais de segurança	17
3.1.1.2.	Duração das ações	18
3.1.1.3.	Classe de serviços	19
3.2.	Madeira maciça	21
3.3.	Madeira lamelada-colada	21
3.4.	Contraplacado	21
3.5.	Aglomerados de partículas de madeira	21
3.6.	Tipos de madeira no XDTimber	22
4.	Tração e compressão	25
4.1.	Tração e compressão paralelas ao fio	25
4.2.	Tração e compressão perpendicular ao fio	26
4.3.	Tração paralela ao fio	26
4.3.1.	Exercício de aplicação Tração paralela ao fio	28
4.3.1.1.	Resolução manual	28
4.4.	Tração perpendicular ao fio	29
4.5.	Compressão paralela ao fio	29
4.6.	Compressão perpendicular ao fio	29
4.6.1.	Exercício de aplicação compressão perpendicular ao fio	31
4.6.1.1.	Resolução manual	31
4.6.1.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	32
5.	Flexão	35
5.1.	Flexão simples	35
5.2.	Flexão composta com tração	37
5.3.	Flexão composta com compressão	37
5.3.1.	Segurança contra o bambeamento	38

5.3.2.	Cálculo do momento crítico elástico.....	39
5.3.3.	Fator de momento uniforme equivalente	40
5.3.4.	Efeito do ponto de aplicação	42
5.4.	Verificação regulamentar	42
5.4.1.	Bambeamento em flexão composta	43
5.4.2.	Mitigação do risco de Bambeamento	44
5.4.3.	Travamento	44
5.4.4.	Exercício de aplicação flexão.....	47
5.4.4.1.	Resolução manual.....	47
5.4.4.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	48
6.	Corte e torção.....	51
6.1.	Verificação ao corte	51
6.2.	Verificação à torção	53
6.3.	Verificação à torção e corte.....	54
6.3.1.	Exercício de aplicação corte e torção.....	55
6.3.1.1.	Resolução manual.....	55
6.3.1.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	56
6.3.2.	Exercício de aplicação Viga com entalhe	56
6.3.2.1.	Resolução manual.....	57
6.3.2.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	58
7.	Pilares e encurvadura	61
7.1.	Esbelteza	61
7.2.	Verificação regulamentar	62
7.3.	Comprimento de encurvadura	64
7.3.1.	Exercício de aplicação pilares e encurvadura	64
7.3.1.1.	Resolução manual.....	64
7.3.1.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	67

8.	Vigas curvas	71
8.1.	Introdução	71
8.2.	Tensões de flexão geral	71
8.3.	Tensões atuantes de flexão no cume	71
8.4.	Tensões resistentes de flexão geral.....	73
8.5.	Tensões resistentes de flexão no cume.....	74
8.6.	Tensões perpendiculares ao fio	75
8.6.1.	Fundamentação	75
8.7.	Disposições regulamentares.....	76
8.7.1.	Tensão atuante perpendicular ao fio.....	76
8.7.2.	Resistência à tração perpendicular ao fio	77
8.7.3.	Exercício de aplicação vigas curvas	78
8.7.3.1.	Resolução manual.....	78
8.7.3.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	81
9.	Ligações pregadas.....	85
9.1.	Pregos	85
9.1.1.	Pregos ao corte	88
9.1.2.	Pregos ao arranque	89
9.1.3.	Interação corte e arranque	92
9.2.	Teoria de Johansen	93
9.3.	Modos de rotura	93
9.4.	Corte simples	95
9.4.1.	Ligações madeira-madeira e derivados	95
9.4.1.1.	Modo de rotura do tipo 1A.....	95
9.4.1.2.	Modo de rotura do tipo 1B.....	97
9.4.1.3.	Modo de rotura do tipo 2	98
9.4.1.4.	Modo de rotura do tipo 3	99

9.4.2.	Ligações madeira-aço.....	100
9.4.2.1.	Modo de rotura do tipo 1 (chapa fina)	100
9.4.2.2.	Modo de rotura do tipo 1 (chapa espessa).....	100
9.4.2.3.	Modo de rotura do tipo 2 (chapa fina)	101
9.4.2.4.	Modo de rotura do tipo 2 (chapa espessa).....	102
9.4.2.5.	Modo de rotura do tipo 3 (chapa espessa).....	102
9.1.	Corte duplo	103
9.1.1.	Ligações madeira-madeira e derivados	103
9.1.1.1.	Modo de rotura do tipo 1A.....	104
9.1.1.2.	Modo de rotura do tipo 2	105
9.1.1.3.	Modo de rotura do tipo 3	106
9.1.2.	Ligações madeira-aço (chapas laterais)	106
9.1.2.1.	Modo de rotura do tipo 1 (qualquer chapa).....	106
9.1.2.2.	Modo de rotura do tipo 2 chapa fina	107
9.1.2.3.	Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa	108
9.1.3.	Ligações madeira-aço (chapa central)	108
9.1.3.1.	Modo de rotura do tipo 1	108
9.1.3.2.	Modo de rotura do tipo 2	109
9.1.3.3.	Modo de rotura do tipo 3	110
9.1.4.	Exercício de aplicação ligações pregadas.....	110
9.1.4.1.	Resolução manual.....	110
9.1.4.2.	Resolução utilizando o programa XDTimber	112
10.	Considerações finais.....	115
10.1.	Conclusões	115
10.2.	Desenvolvimentos futuros.....	116
11.	Referências bibliográficas	117
12.	Anexos	119

Índice de Figuras

Figura 1: Metodologia de cálculo para estruturas em madeira.....	2
Figura 2: Criação do projeto.....	3
Figura 3: Estrutura if else	6
Figura 4: Form 1	8
Figura 5: Linha de código	9
Figura 6: Caixa de ferramentas	9
Figura 7: Botões de comando	10
Figura 8: Caixa de combinações.....	10
Figura 9: Imagem.....	10
Figura 10: Botão de opção	11
Figura 11: Caixa de texto simples.....	11
Figura 12: Janela de propriedades	11
Figura 13: SQL server.....	12
Figura 14: Base de dados.....	13
Figura 15: Características da tabela	13
Figura 16: Introdução de dados	14
Figura 17: Tabela do kmod no programa “XDTimber”	20
Figura 18: Tipos de madeira no programa “XDTimber”	22
Figura 19: Curva tensão – extensão	25
Figura 20: Resistência e rigidez (a), (b) e (c).....	26
Figura 21: Exercício de tração utilizando o programa “XDTimber”	29
Figura 22: Vigas continuamente apoiadas	30
Figura 23: Vigas com apoios discretos	30
Figura 24: Exercício de compressão utilizando o programa “XDTimber”	32
Figura 25: Flexão desviada	35

Figura 26: Flexão simples com momento segundo z	35
Figura 27: Flexão simples com momento segundo y	35
Figura 28: Flexão desviada diagramas das tensões	36
Figura 29: Gráfico da flexão composta com compressão	37
Figura 30: Consola sem bambeamento (Negrão)	38
Figura 31: Consola com bambeamento (Negrão)	38
Figura 32: Distribuição de tensões em consola (Negrão)	38
Figura 33: Consola com encurvadura (Negrão).....	39
Figura 34: Fator de momento equivalente	40
Figura 35: Valores de m.....	41
Figura 36: Valores de m simplificado	41
Figura 37: Efeito do ponto de aplicação superior	42
Figura 40: Gráfico da curva de bambeamento.....	43
Figura 41: Travamento recorrendo a sarrafos (Negrão)	45
Figura 42: Travamento recorrendo aos soalhos (Negrão)	45
Figura 43: Travamento recorrendo aos apoios (Negrão).....	45
Figura 44: Forças estabilizadoras contra o bambeamento (Negrão)	46
Figura 45: Exercício de Flexão utilizando o programa “XDTimber”	48
Figura 46: Corte paralelo ao fio.....	51
Figura 48: Proximidade do apoio	52
Figura 49: Seção circular submetida à torção	53
Figura 50: Interação corte e torção.....	54
Figura 51: Exercício de corte e torção utilizando o programa “XDTimber”	56
Figura 52: Ilustração da viga com entalhe no programa “XDTimber”	56
Figura 53: Exercício de Viga com entalhe utilizando o programa “XDTimber”	58
Figura 54: Fenómeno de encurvadura	61
Figura 55: Curva de encurvadura	62

Figura 58: Comprimentos de encurvadura (Meneses, 2012).....	64
Figura 59: Exercício de pilares e encurvadura utilizando o programa “XDTimber”	67
Figura 60: Viga curva	72
Figura 61: Lamela submetida a momentos de extremidade	74
Figura 62: Mudança de direção na zona do cume	75
Figura 63: Tração perpendicular ao fio	76
Figura 64: Rotura por tração transversal	76
Figura 65: Armaduras transversais.....	76
Figura 66: Exercício de vigas curvas utilizando o programa “XDTimber”	81
Figura 67: Pregos com incisões anelares.....	85
Figura 68: Pregos helicoidais.....	85
Figura 69: Dimensões do prego.....	86
Figura 70: Bitolas de pregos redondos (Negrão, 2009).....	86
Figura 71: Esquema de ligações	86
Figura 72: Solicitações na ligação.....	87
Figura 73: Rotura plástica.....	88
Figura 74: Pregos ao arranque a)	89
Figura 75: Pregos ao arranque b)	90
Figura 76: Comprimento de penetração a)	91
Figura 77: Comprimento de penetração b).....	91
Figura 78: Pressões de contato	93
Figura 79: Ligações simples e dupla	94
Figura 80: Ligações por cavilha (viga coluna)	94
Figura 81: Parâmetros da ligação simples.....	95
Figura 82: Modo de rotura do tipo 1A1 madeira-madeira ligação simples	96
Figura 83: Modo de rotura do tipo 1A2 madeira-madeira ligação simples	96
Figura 84: Modo de rotura do tipo 1B madeira-madeira ligação simples	97

Figura 85: Modo de rotura do tipo 2A madeira-madeira ligação simples	98
Figura 86: Modo de rotura do tipo 2B madeira-madeira ligação simples	99
Figura 87: Modo de rotura do tipo 3 madeira-madeira ligação simples	99
Figura 88: Modo de rotura do tipo 1 chapa fina ligação simples.....	100
Figura 89: Modo de rotura do tipo 1 chapa espessa ligação simples	101
Figura 90: Modo de rotura do tipo 2 chapa fina ligação simples.....	101
Figura 91: Modo de rotura do tipo 2 chapa espessa ligação simples	102
Figura 92: Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa ligação simples	103
Figura 93: Parâmetros da ligação dupla.....	104
Figura 94: Modo de rotura do tipo 1A1 madeira-madeira ligação dupla	104
Figura 95: Modo de rotura do tipo 1A2 madeira-madeira ligação dupla	105
Figura 96: Modo de rotura do tipo 2 madeira-madeira ligação dupla.....	105
Figura 97: Modo de rotura do tipo 3 madeira-madeira ligação dupla.....	106
Figura 98: Modo de rotura do tipo 1 qualquer chapa (lateral) ligação dupla.....	107
Figura 99: Modo de rotura do tipo 2 chapa fina (lateral) ligação dupla	107
Figura 100: Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa (lateral) ligação dupla.....	108
Figura 101: Modo de rotura do tipo 1 chapa espessa (central) ligação dupla.....	109
Figura 102: Modo de rotura do tipo 2 chapa espessa (central) ligação dupla.....	109
Figura 103: Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa (central) ligação dupla.....	110
Figura 104: Exercício de ligações pregadas (dados) utilizando o programa “XDTimber”	112
Figura 105: Exercício de ligações pregadas utilizando o programa “XDTimber”	112
Figura A 1: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício tração)	119
Figura A 2: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício compressão)	120
Figura A 3: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício flexão)	121
Figura A 4: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício corte e torção).....	122
Figura A 5: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício Viga com entalhe)	123
Figura A 6: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício pilares e encurvadura) ...	124

Figura A 7: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício vigas curvas)	125
Figura A 8: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício ligações pregadas).....	126

Índice de Tabelas

Tabela 1: Sufixos associados aos valores	4
Tabela 2: Operadores aritméticos.....	5
Tabela 3: Operadores lógicos.....	5
Tabela 4: Função round.....	7
Tabela 5: Função SQRT.....	7
Tabela 6: Função Pow	7
Tabela 7: Funções de ângulos	8
Tabela 8: Coeficientes parciais de segurança	17
Tabela 9: Classe de duração das ações	18
Tabela 10: Classe de serviços	19
Tabela 11: Exemplo de acções	21
Tabela 12: Limitação da teoria de johansen	98

Simbologia

A	Área efetiva seção transversal
A_{ef}	Área efetiva da superfície total de contacto entre uma placa metálica cravada e a madeira
$A_{net,t}$	Área útil da secção perpendicular ao fio
$A_{net,v}$	Área útil de corte paralela ao fio
$E_{0,05}$	Valor correspondente às do módulo de elasticidade
E_{mean}	Valor médio do módulo de elasticidade
$E_{meanfin}$	Valor médio final do módulo de elasticidade
F	força
$F_{A,Ed}$	Valor de cálculo de uma força aplicada numa placa metálica cravada ao nível do centro de gravidade da área efetiva
$F_{A,min,d}$	Valor de cálculo mínima atuante numa placa metálica cravada, ao nível do centro de gravidade da respetiva área afetiva
$F_{ax,Ed}$	Valor de cálculo de um esforço axial num ligador
$F_{ax,Rd}$	Valor de cálculo da resistência ao arranque axial do ligador
F_c	Força de compressão
F_d	Valor de cálculo de uma força
$F_{d,er}$	Valor de cálculo de uma força no estado limite de utilização
$F_{M,Ed}$	Valor de cálculo de uma força resultante do valor de cálculo de um momento
F_t	Força de tração
$F_{v,,Rk}$	Valor característico da capacidade resistente de um conector na direção do fio
$F_{V,Ed}$	Valor de cálculo do esforço transversal por plano de corte do ligador; valor de cálculo horizontal num diafragma de parede
$F_{x,Ed}$	Valor de cálculo de uma força na direção x

$F_{y,Ed}$	Valor de cálculo de uma força na direção y
$F_{x,Rd}$	Valor de cálculo da capacidade resistente da placa na direção x
$F_{y,Rd}$	Valor de cálculo da capacidade resistente da placa na direção y
$F_{x,Rk}$	Valor característico da capacidade resistente da placa na direção x
$F_{y,Rk}$	Valor característico da capacidade resistente da placa na direção y
$G_{0,05}$	Valor do módulo de distorção correspondente ao quantilho de 0.05%
G_d	Valor de cálculo do módulo de distorção
G_{mean}	Valor médio do módulo de distorção
I_z	Momento de inércia em relação ao eixo de menor resistência
$M_{y,Rk}$	Valor característico do momento de cedência plástica de um ligador
a	Distância
a_1	Espaçamento, paralelamente ao fio, entre ligadores dispostos numa fiada
a_2	Espaçamento, perpendicularmente ao fio, entre ligadores dispostos numa fiada
b	largura
d	diâmetro
$F_{ax,k}$	Valor característico do parâmetro de arranque para pregos
$f_{c,0,d}$	Valor de cálculo da resistência à compressão na direção do fio
$f_{c,90,k}$	Valor característico da resistência à compressão na direção perpendicular ao fio
$f_{head,k}$	Valor característico do parâmetro da resistência à penetração dos pregos
$f_{m,k}$	Valor característico da resistência à flexão
$f_{m,y,d}$	Valor de cálculo da resistência à flexão em relação ao eixo y principal
$f_{m,z,d}$	Valor de cálculo da resistência à flexão em relação ao eixo z principal

$f_{t,0,d}$	Valor de cálculo da resistência à tração do fio
$f_{t,0,k}$	Valor característico da resistência à tração na direção do fio
h_{ap}	Altura da zona de cumeeira
h_d	Profundidade do furo
$K_{c,y}$ ou k_c	Factor de instabilidade
k_{crit}	Factor utilizado para o bambeamento
k_d	Factor de dimensão para um painel
k_{def}	Factor de deformação
K_{dis}	Factor que tem em conta a distribuição de tensões na zona de cumeeira
$K_{f,1}, k_{f,2}, k_{f,3}$	Factores de correção para a resistência ao contraventamento

Capítulo 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspeto geral

A madeira, devido às suas características, tem sido um material de eleição utilizado pelo Homem desde tempos primordiais. A sua aplicação pode abranger áreas muito distintas, desde pequenos objetos decorativos até grandes estruturas como casas e pontes. Podemos constatar a sua grande relevância na nossa vida quotidiana e por esse motivo o estudo e desenvolvimento de técnicas que nos permitam ter uma maior garantia do controlo sobre esse material e sobre a sua aplicação torna-se crucial. *“Construir com madeira apresenta inúmeras vantagens sob os mais variados pontos de vista, o que justifica os cerca de 90% de construção habitacional em madeira em regiões desenvolvidas como a Austrália, Escandinávia e América do Norte”* (Cachim, 2014)

Verificar a estabilidade de estruturas em madeira é em tudo semelhante à verificação realizada para estruturas metálicas ou em betão. A principal dificuldade no cálculo de estruturas em madeira prende-se com a obtenção de valores de cálculos para os materiais. É necessário ter em conta que a madeira é de origem orgânica e como tal tem carências que outros materiais utilizados na construção civil não têm, como por exemplo a suscetibilidade de se degradarem devido ao aparecimento de fungos, insetos e outros organismos. Por este facto para a madeira existem classes de risco consoante a sua propensão para ser afetada por estes elementos (Negrao, 2009).

Segundo (Maia, 2013) as competências exigidas aos engenheiros têm evoluído ao longo dos tempos, por forma a fazer face aos novos desafios que lhes são colocados e em concordância com a evolução da tecnologia ao seu dispor. A Revolução Industrial que teve origem no início do século XVIII, em Inglaterra, proporcionou um conjunto de avanços tecnológicos que tiveram profundo impacto nos processos produtivos e na economia ao nível mundial. Desde então, o desenvolvimento económico, técnico e científico foi incessante.

Em simultâneo com esta evolução foram desenvolvidas ferramentas que visam auxiliar o engenheiro na sua tarefa, tornando os cálculos cada vez mais expeditos e com uma maior qualidade e rigor científico. O C# é uma linguagem de programação da Microsoft que é executada na plataforma .Net, e é orientada para objetos, pretendendo ser uma ferramenta simples de utilizar, fácil de compreender e robusta (Carvalho, 2010).

Neste âmbito estabelece-se como objetivo da Dissertação o desenvolvimento de um programa capaz de verificar a segurança de diversos tipos de solicitação nas estruturas em madeira.



Figura 1: Metodologia de cálculo para estruturas em madeira

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como propósito o desenvolvimento de um programa informático, em linguagem Microsoft c# (csharp), capaz de verificar a resistência à tração, à compressão, à flexão, ao corte e torção, pilares e encurvadura, vigas curvas e assim como as ligações pregadas de estruturas em madeira, segundo Eurocódigo 5: Projeto de estruturas de madeira, doravante designada por EC5.

Pretende-se que esta ferramenta seja intuitiva, de fácil utilização por parte de qualquer utilizador, por uma questão de facilidade da interação programa-utilizador, deverão ser incorporadas ainda diversas funcionalidades tais como o “gravar”, “pré-visualização”, “imprimir”, “auto gravação”, uma pequena calculadora incorporada no programa assim como figuras ilustrativas referentes aos dados a introduzir no programa pelo utilizador.

Outro desafio presente nesta dissertação é a criação de uma base de dados que possa englobar diversos tipos de madeira, para que desta forma possa ser possível obter dados relevantes para os cálculos, tais como, a sua resistência, massa volúmica, módulo de elasticidade entre outros de uma forma mais expedita.

No corpo principal do programa deverá haver um espaço dedicado a *inputs* a designar pelo utilizador, caso das dimensões da peça estrutural em estudo assim como um espaço em que o utilizador deverá escolher de forma automática as características da madeira recorrendo a uma base de dados no programa XDTimber, outro input será referente a uma tolerância de cálculo a ser

estabelecida pelo utilizador que irá afetar o valor de cálculo do esforço atuante. É relevante contudo referir que o rigor científico exigido no cálculo estrutural das estruturas em madeira segundo o EC5 deverá ser sempre salvaguardado.

O resultado final será inserido conjuntamente com outros programas de cálculo desenvolvidos por alunos de engenharia civil da universidade de Aveiro “Civil XD”

1.3. Estado limite último

O efeito das ações (tais como as forças axiais e de corte, momentos fletores ou deslizamentos nas ligações) provoca deformações na estrutura assim como a variação do teor em água, desta forma é necessário manter estes efeitos dentro de limites apropriados atendendo a possibilidade da deformação causar danos nos materiais de revestimento, tetos entre outros, as combinações de ações para a verificação de segurança no estado limite último por ser calculada pela seguinte expressão:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})} \quad (1)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + \psi_2 k_{def})} \quad (2)$$

Em que:

- E_{mean} Valor médio do módulo de elasticidade
- G_{mean} Valor médio do módulo de distorção
- k_{def} Fator que tem em conta a classe de serviço
- ψ_2 Coeficiente para o valor quase-permanente da ação

1.4. Bases para o projeto

Para o desenvolvimento desta dissertação tiveram como bases de partida os seguintes livros e normais:

- EN 1995 -1 – 1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings (1995-1-1, 2004)
- Negrão, J. e Faria, A. (2009). *Projecto de Estruturas de Madeira*: Publindústria, Edições Técnicas.

- EN 1995 -1 – 2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design (1995-1-2, 2004)
- EN 383 Timber structures - Test methods - Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners (383, 2004)
- NP EN 1194 Estrutura de madeira: Madeira lamelada-colada: Classes de resistência e determinação dos valores característicos (1194, 2002)

Capítulo 2

Programação

2. PROGRAMAÇÃO

2.1. Visual Studio c#

2.1.1. Descrição do software

O C# é uma linguagem de programação desenvolvida pela Microsoft que é executada sobre o *.NET Framework*, a sua pronúncia é «C sharp». Atualmente este serviço é disponibilizado gratuitamente sendo que é uma compilação de várias linguagens tais como Visual C++, Visual F# e Visual Basic. C# é uma linguagem simples que permite inovar sendo que mantém a expressividade do estilo das linguagens C (Microsoft).

2.1.2. Criação do projeto

Para a criação de novo projeto deve escolher a opção Windows form como podemos visualizar na figura seguinte em que para aceder a essa opção deve ser clicada em:

File ➡ New project ➡ Windows Form

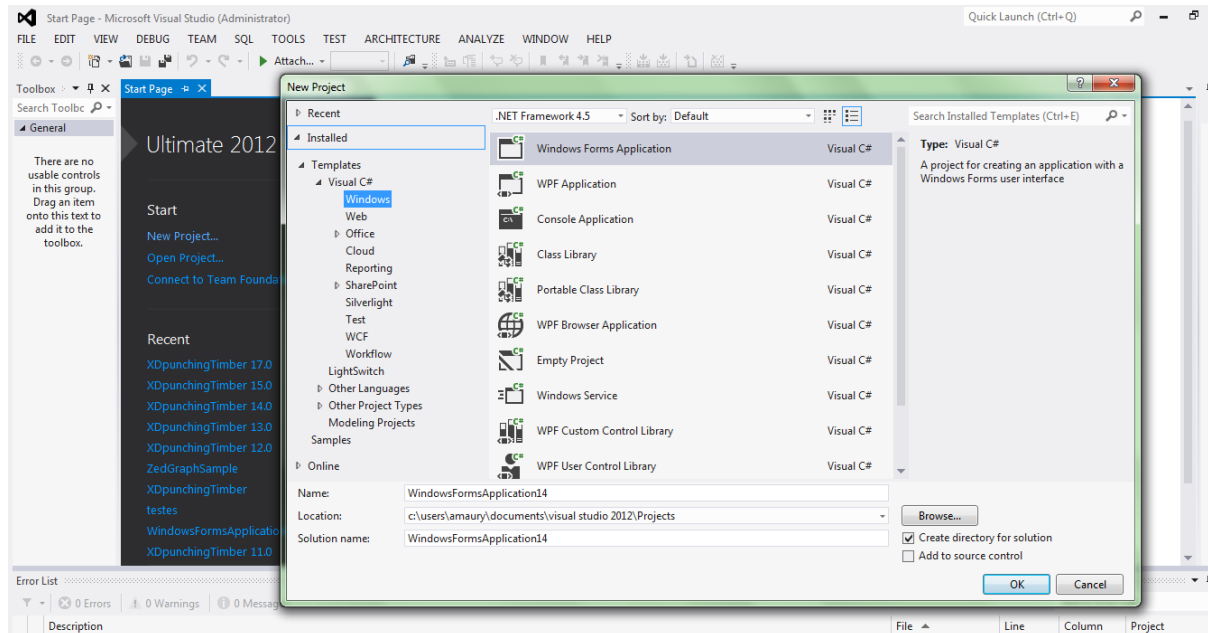


Figura 2: Criação do projeto.

2.1.3. Elementos de programação

Cada tipo de dados é específica para a finalidade pretendida, isso é, cada dado tem informação assim como tamanhos predefinidos.

No caso de valores numéricos temos vários tipos de dados sendo que cada uma é caracterizada por um sufixo, esta separação tem como fundamento a necessidade de controlo de velocidade de processamento de informação, na seguinte tabela podemos verificar alguns dos vários tipos.

Tabela 1: Sufixos associados aos valores

Tipo de dados	Sufixo	Exemplo	Gama de valores de armazenamento
UINT	U	uint valor = 35U	0 e 4294967295
LONG	L	long valor = 24L	-9223372036854775808 e 9223372036854775807
ULONG	UL	ulong valor = 41UL	0 e 18446744073709551615
FLOAT	F	float valor = 26.3F	1.5×10^{-45} a $\pm 3.4 \times 10^{38}$
DOUBLE	D	double valor = 78.3D	1.0×10^{-324} a $\pm 1.7 \times 10^{308}$
DECIMAL	M	decimal valor = 52.4M	1.0×10^{-28} a $\pm 7.9 \times 10^{28}$

2.1.4. Operadores

Os operadores são símbolos que caracterizam operações matemáticas indicando o tipo de operação, estas estão subdivididas em 3 grupos: aritméticas, relacionais e lógicos.

2.1.4.1. Operadores aritméticos

Este tipo de operadores são a base de operações básicas da matemática tais como adição, subtração, multiplicação e a divisão. O seguinte quadro mostra exemplos desses operadores:

Tabela 2: Operadores aritméticos

Operadores	Exemplos	Retorna
Adição	$8 + 7$	15
	$1.5 + 2.5$	4
Subtração	$5 - 2$	3
	$4 - (-3)$	7
Multiplicação	$(-5) * (-2)$	10
	$2.87 * 0$	0
Divisão	$8 / 3$	2.667
	$8 / (-4)$	-2

2.1.4.2. Operadores relacionais

Este tipo de operadores tem como principal função promover a comparação entre valores sendo que retorna apenas um dos dois valores lógicos: true ou false

Tabela 3: Operadores lógicos

Operador	Exemplo	Retorna
Igual	$7 == 3+4$	true
	$7 == 3-4$	false
Maior	$9 > 7$	true
	$10 + 3 > 12 + 1$	false
Menor	$-5 < 0$	true
	$10.5 < 10.2$	false
Maior ou igual	$6 >= 7$	false
	$7 >= 7$	true
Menor ou igual	$7 <= 5 + 1$	false
	$7 <= 7$	true
Diferente	$10 != 10$	false
	$20 != 11$	true

2.1.5. Estruturas de controlo

Esta funcionalidade permite ao utilizador escrever códigos em qualquer ponto do programa com a finalidade de tomar decisões ou repetir sequencialmente certas instruções, estas estão subdivididas em estrutura de decisões (condições) e estruturas de repetição (ciclo).

2.1.5.1. Estruturas de decisão

Estes elementos averigam se uma condição é verdadeira ou falsa executando as condições estabelecidas mediante o resultado, geralmente são utilizadas expressões de comparação de variáveis.

if e if else

Esta estrutura averigua se a condição é verdadeira e executa as condições definidas no caso da estrutura if else apresenta alternativas caso a primeira condição não seja válida

Sintaxe:

If(condição)

```
{  
  
    [bloco de instrução]  
  
}  
  
else  
  
{  
  
    [bloco de instrução]  
  
}
```

Exemplo:

```
if (textBox_33 <= output)  
{  
  
    string sVerific = ("Verifica");  
    textBox35.Text = sVerific;  
}  
  
else  
{  
    string sVerific = ("Não verifica");  
    textBox35.Text = sVerific;  
}
```

Figura 3: Estrutura if else

2.1.5.2. Funções intrínsecas

Esta seção tem como base a apresentar as diversas funções e o modo de aplicação no programa c#. Existe uma grande diversidade de funções predefinidas na *framework* que são relevantes no desenvolvimento do programa. Estas funções estão definidas na classe *System.Math*. Algumas serão exemplificado em seguida.

Função Round, esta função arredonda valores reais para um numérico particularizado de casas decimais :

Tabela 4: Função round

Double N;	Devolve
N = System.Math.Round(3.14,1)	3.1
N = System.Math.Round(-9.8,0)	-10
N = System.Math.Round(9.4,0)	9

Função SQRT, esta função permite calcular a raiz quadrada de um número:

Tabela 5: Função SQRT

Double raiz quadrada;	Devolve
Raiz quadrada = System.Math.Sqrt(4)	2

Função POW, esta função permite elevar um número a outro, sendo que é obrigatório a utilização de dois argumentos em que x é a base e y é o expoente:

Tabela 6: Função Pow

Double valor;	Devolve
valor = System.Math.Pow(3,2)	9

Funções SIN, ASIN, COS, ACOS, TAN e ATAN, estas funções permitem o cálculo prospectivamente do seno, arcosseno, cosseno, arcocosseno, tangente e arcotangente.

É relevante ter ainda em conta que nas funções Sin, Cos e Tan os ângulos são medidos em radianos.

O valor da constante pi esta definido na classe *System.Math* e pode ser obtido recorrendo a seguinte expressão *System.Math.PI*.

Tabela 7: Funções de ângulos

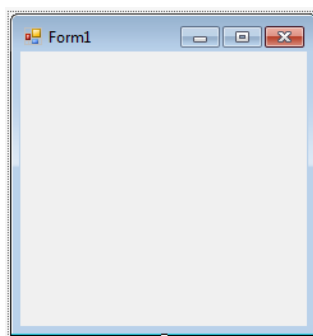
Double seno, aseno, coseno, acoseno, tangente, atangente;	Devolve
Seno = System.Math.Sin(2)	0.9092974268
aseno = System.Math.Asin(1)	1.5707963267
coseno = System.Math.Cos(3)	-0.98999249600
acoseno = System.Math.Acos(0.5)	1.04719755119
tangente = System.Math.Tan(5)	-3.38051500624
atangente = System.Math.Atan(1.5)	0.98279372324

2.1.6. Windows form

Esta interface é uma das mais relevantes para o desenvolvimento de aplicações Windows, esta equipada com diversas funcionalidades que permitem desenvolver a interface gráfica necessária para as aplicações e os utilizadores finais

Esta interface está incluída na *framework*, *namespace System.Windows.Forms* a qual permite um acesso ao GDI do sistema operativo por recurso a uma programação mais robusta e sem recurso direto as funções API.

Após a criação de um projeto Windows forms surge:

**Figura 4: Form 1**

Para aceder a linha de código associado a interface deve ser realizado o duplo clique:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsFormsApplication15
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
        }
    }
}
```

Figura 5: Linha de código

2.1.6.1. Toolbox (caixa de ferramentas)

Esta opção permite aceder aos vários controlos utilizados para a Windows form; servem para a introdução de texto e apresentação de resultados assim como para a execução de tarefas determinadas, como podemos constatar na seguinte figura:

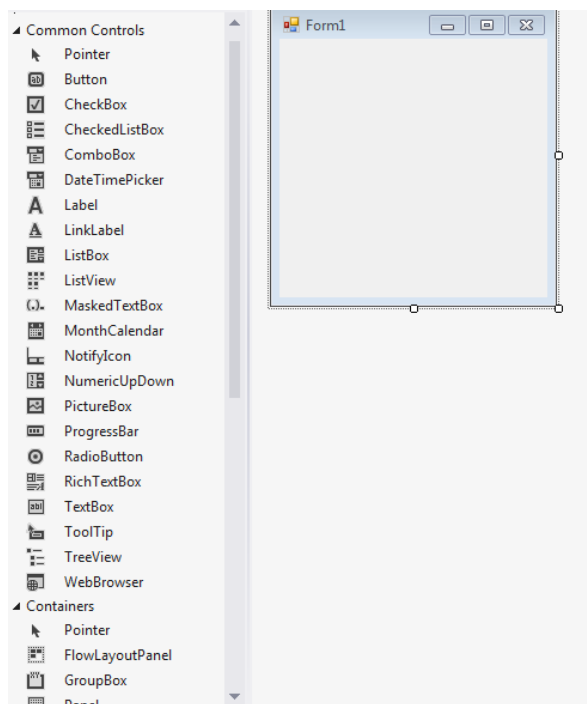


Figura 6: Caixa de ferramentas

2.1.6.2. Common controls

Button (Botão de comando)

Os botões desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de aplicações, pois permitem desempenhar papéis específicos como podemos verificar na figura seguinte.

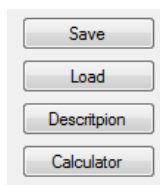


Figura 7: Botões de comando

Combobox (Caixa de combinações)

É um mecanismo que permite listar um conjunto de opções das quais o utilizador deve escolher uma, pois ela não permite escolhas múltiplas:

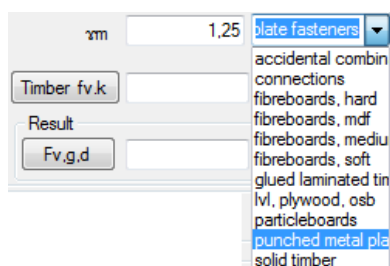


Figura 8: Caixa de combinações

PictureBox (Imagem)

Esta opção permite incorporar imagens através de ficheiros gráficos, existindo uma gama variada de opções de controlo tais como a definição da transparência, ampliações, redimensionamento como podemos ver no exemplo que se segue:



Figura 9: Imagem

Radiobutton (Botão de opção)

Este tipo de controlo é essencialmente utilizado quando há um reduzido número de opções a seleccionar, o botão está escolhido quando um círculo se encontra no seu interior, uma das principais características que define o *radiobutton* é a possibilidade de elas integrarem um grupo segundo uma

lógica e também pelo facto de elas estarem relacionadas uma com a outra, pois ao seleccionar um deles o outro fica inativo. A figura seguinte exemplifica este acontecimento:

Figura 10: Botão de opção

Textbox (Caixa de texto simples)

Esta controlo permite indicar onde dispor os caracteres e quais tipo de caracteres, com vista a esclarecer tanto o número mínimo assim como máximo permitido como podemos verificar na seguinte figura:

Figura 11: Caixa de texto simples

Janela de propriedades

Esta aplicação permite realizar de uma forma rápida as alterações desejadas nas propriedades dos objetos. Todos os objetos têm propriedades predefinidas que podem ser alteradas consoante as preferências do programador, no caso da Figura 4 podemos alterar as suas definições quando ela está seleccionada recorrendo aos atributos da janela de propriedades exemplificada na Figura 12:

Figura 12: Janela de propriedades

2.2. SQL server

A possibilidade de consultar e manusear uma base de dados pelo Visual Studio teve início no ano 2008, o LINQ permitiu integrar o SQL Server na *framework*. Para ser possível estabelecer uma ligação com a base de dados SQL de ser utilizada a classe Datacontext que é uma forma simples e intuitiva de realizar a ligação recorrendo a códigos, esta classe está definida no *namespace* *System.Data.Linq* sendo elas a suporte das interações com o servidor. Podemos averiguar na seguinte figura o SQL Workbench.

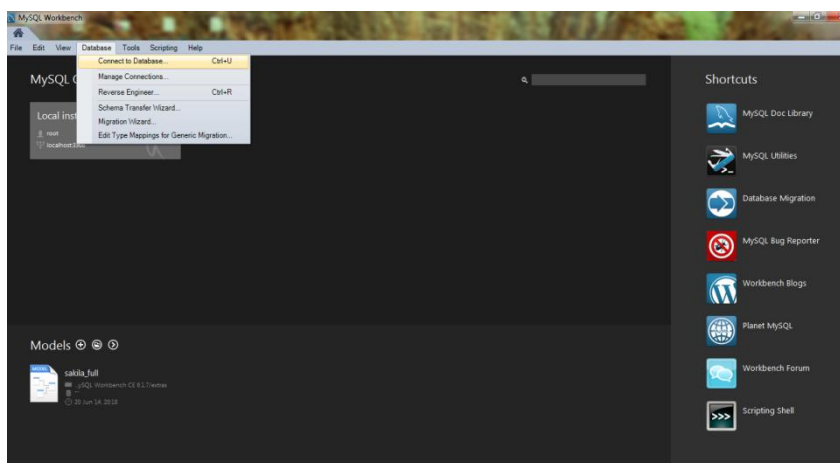


Figura 13: SQL server

2.2.1. Criação de base de dados

Após iniciar o programa deve ser clicado com o botão direito do rato sobre a pasta Databases e escolher a opção New Database, como podemos verificar na figura seguinte.

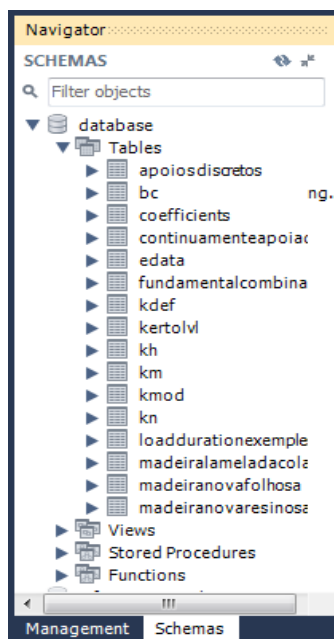


Figura 14: Base de dados

Deve ser procedida da mesma forma clicando em *New Table* para a criação de uma tabela de base de dados e preencher com o dados que pretendemos na table, em *Column Name* deve ser inserida os nomes pretendidos que não poderão ser idênticos. Para esse facto ser possível, as opções PK e NN devem estar seleccionadas como podemos constatar na Figura 15. No fim deve ser guardada a tabela

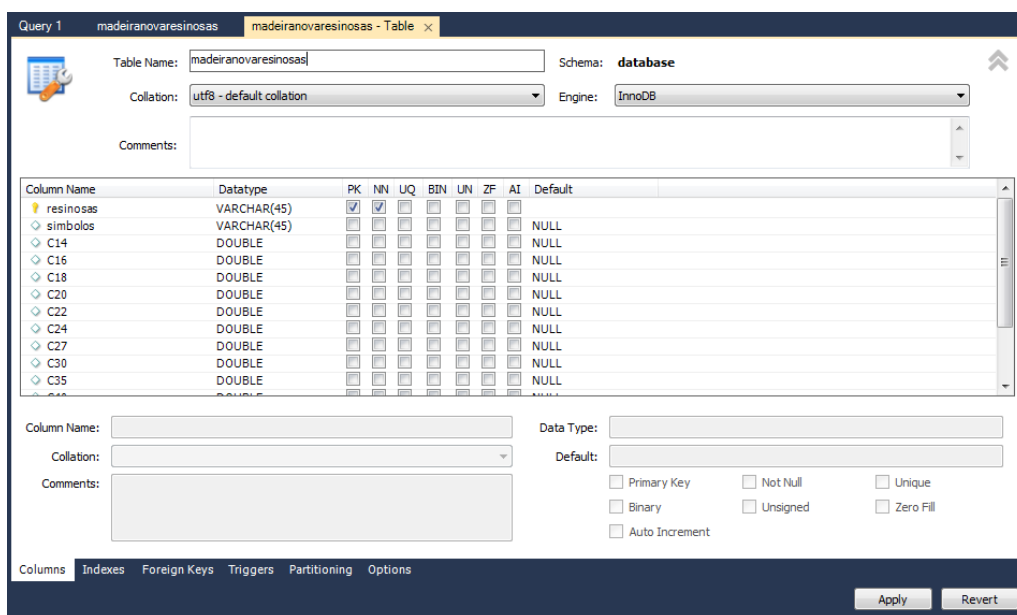


Figura 15: Características da tabela

Posteriormente à criação da tabela, podem ser inseridos novos dados, como podemos ver na figura seguinte:

Result Grid		Filter Rows:	Edit:	Export/Import:	Wrap Cell Content:									
	resinosas	simbolos	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
▶	Características	pk	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
	compressao0	fc,0,k	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
	compressao90	fc,90,k	2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
	corte	fv,k	1.7	1.8	2	2.2	2.4	2.5	2.8	3	3.4	3.8	3.8	3.8
	flexao	fmk	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
	Massa volumica em Kg/m^3	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
	media	pmean	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550
	modulo de distorção	G	0.44	0.5	0.56	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88	0.94	1
	modulo de elasticidade	E0,mean	7	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	14	15	16
	modulo de elasticidade (5º pe...	E0,05	4.7	5.4	6	6.4	6.7	7.4	7.7	8	8.7	9.4	10	10.7
	modulo E	E90,mean	0.23	0.27	0.3	0.32	0.33	0.37	0.38	0.4	0.43	0.47	0.5	0.53
	Propriedades resistentes em ...	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
	Propriedades rigidez em KN/m...	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
	tracao0	ft,0,k	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
	tracao90	ft,90,k	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Figura 16: Introdução de dados

Capítulo 3

Resistências de cálculo

3. RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO

3.1. Valor de Cálculo das resistências

O valor de cálculo R_d de uma resistência deve ser calculada da seguinte forma:

$$R_d = K_{\text{mod}} \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (3)$$

- R_k Valor característico de uma resistência
- γ_M Coeficiente parcial de segurança para propriedades de material
- k_{mod} Fator de modificação da resistência que tem em conta a duração das ações e teor em água na madeira.

3.1.1.1. Coeficientes parciais de segurança

Tabela 8: Coeficientes parciais de segurança

Combinações fundamentais	Coeficientes parciais de segurança γ_M
Madeira maciça	1.3
Madeira lamelada colada	1.25
LVL, contraplacado, OSB	1.2
Aglomerados de partículas de madeira	1.3
Aglomerados de fibras de madeira duro	1.3
Aglomerados de madeira semi-duro	1.3
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	1.3

3.1.1.2. Duração das ações**Tabela 9: Classe de duração das ações**

Material	Norma	Classe de serviço	Classe de duração das ações				
			Ação permanente	Ação de longa duração	Ação de média duração	Ação de curta duração	Ação instantânea
Madeira maciça	EN 14081-1	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90
Madeira lamelada colada	EN 14080	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90
Contraplacado	EN 636 Parte 1,2,3	1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		2	0.60	0.70	0.80	0.90	1.10
		3	0.50	0.55	0.65	0.70	0.90
OSB	EN 300	1	0.30	0.45	0.65	0.85	1.10
		1	0.40	0.50	0.70	0.90	1.10
		2	0.30	0.40	0.55	0.70	0.90
Aglomerado de partículas de madeira	EN 312	1	0.30	0.45	0.65	0.85	1.10
		2	0.20	0.30	0.45	0.60	0.80
		1	0.40	0.50	0.70	0.90	1.10
		2	0.30	0.40	0.55	0.70	0.90
Aglomerado de partículas de madeira duro	EN 622-2	1	0.30	0.45	0.65	0.85	1.10
		2	0.20	0.30	0.45	0.60	0.80
Aglomerado de partículas de madeira semi-duro	EN 622-3	1	0.20	0.40	0.60	0.80	1.10
		1	0.20	0.40	0.60	0.80	1.10
		2	-	-	-	0.45	0.80

3.1.1.3. Classe de serviços**Tabela 10: Kdef**

Material	Norma	Classe de serviço		
		1	2	3
Madeira maciça	EN 14081-1	0.60	0.80	2.00
Madeira lamelada colada	EN 14080	0.60	0.80	2.00
LVL	EN 14374, EN 14279	0.60	0.80	2.00
Contraplacado	EN 636 Parte 1,2,3			
	Parte 1	0.80	-	-
	Parte 2	0.80	1.00	-
	Parte 3	0.80	1.00	2.50
OSB	EN 300			
	OSB/2	2.25	-	-
	OSB/3, OSB/4	1.50	2.25	-
Aglomerado de partículas de madeira	EN 312			
	Parte 4	2.25	-	-
	Parte 5	2.25	3.00	-
	Parte 6	1.50	-	-
	Parte 7	1.50	2.25	-
Aglomerado de partículas de madeira duro	EN 622-2			
	HB.LA	2.25	-	-
	HB.HLA1, HB.HLA2	2.25	3.00	-
Aglomerado de partículas de madeira semi-duro	EN 622-3			
	MBH.LA1, MBH.LA2	3.00	-	-
	MBH.HLS1, MBH.HLS2	3.00	4.00	-

Classe de serviço 1: as condições para as quais é necessário reunir para se incluir nesta categoria é durante algumas semanas por ano o teor em água de equilíbrio num ambiente a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa superior a 65%

Classe de serviço 2: as condições para as quais é necessário reunir para se incluir nesta categoria é durante algumas semanas por ano o teor em água de equilíbrio num ambiente a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa superior a 85%

Classe de serviço 3: as condições para as quais é necessário reunir para se incluir nesta categoria são ter valores de teor em água dos materiais superiores aos que se encontram na classe de serviço 2

Corte e Torção

File Tool Color Índice

Corte e Torção Knod alfa Madeiras

	kmod	standar	service class	long term action	permanent action	medium term action	short term action	instantaneous action
►	fibreboard hard 1	EN 622-2	1	0,3	0,45	0,65	0,85	1,1
	fibreboard hard 2	EN 622-2	2	0,2	0,3	0,45	0,6	0,8
	fibreboard mdf 1	EN 622-5	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1
	fibreboard mdf 2	EN 622-5	2				0,45	0,8
	fibreboard medium	EN 622-3	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1
	fibreboard mediu...	EN 622-3	1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1
	fibreboard mediu...	EN 622-3	2				0,45	0,8
	glued laminated ti...	EN 14080	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	glued laminated ti...	EN 14080	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	glued laminated ti...	EN 14080	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
	lvl 1	EN 14374, EN 1...	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	lvl 2	EN 14374, EN 1...	2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
	lvl 3	EN 14374, EN 1...	3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
	osb 1	EN 300	1	0,3	0,45	0,65	0,7	0,9
	osb 2	EN 300	2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1
	osb 3	EN 300	3	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9

Figura 17: Tabela do kmod no programa “XDTimber”

Tabela 11: Exemplo de ações

Classe de duração das ações	Ordem de grandeza da duração acumulada do valor característico da ação	Exemplos de ação
Permanente	Superior a 10 anos	Peso próprio
Longa duração	6 meses – 10 anos	Produtos armazenados
Média duração	1 semana – 6 meses	Sobrecargas
Curta duração	Inferior a 1 semana	Neve e vento
Instantânea		Ações acidentais

3.2. Madeira maciça

As características da resistência, da rigidez e da massa volúmica devem ser obtidos em conformidade com os métodos no EN-384, os ensaios devem estar em conformidade com EN-408. Na aquisição dos valores de classe de resistência deve-se verificar o EN-338, para as ligações de entalhes múltiplos consultar o EN-386.

3.3. Madeira lamelada-colada

Esta madeira deve satisfazer aos requisitos dispostos no EN-386, a sua rigidez e resistências devem ser determinados com base em ensaios dos projetos EN-408.

3.4. Contraplacado

Este material derivado da madeira deve ser produzido de modo a conservar integridade e resistência, para tal deve satisfazer o projeto EN636, pode ser utilizada nas classes de serviço 1,2 ou 3.

3.5. Aglomerados de partículas de madeira

Este material é um derivado da madeira e na sua produção deve-se proteger a sua integridade e a resistência na classe de serviço para o qual se destina, quando são produzidas com base em EN-312-5 poderá ser utilizada nas classes de serviço 1 ou 2, na eventualidade de ser produzida com recurso as normas EN-312-4, pode ser utilizada na classe de serviço 1.

A glomerado de macro partículas que satisfaça as EN-300, destinadas a ser utilizadas nas classes de serviço 3 ou 4, em princípio só poderá ser utilizada nas classes de serviço 1 ou 2.

3.6. Tipos de madeira no XDTimber

O aglomerado da fibra de madeira é um derivado da madeira e na sua produção deve-se proteger a sua integridade e a resistência na classe de serviço para o qual se destina, quando são produzidas segundo EN-622-5, poderá ser utilizada para as classes de serviço 1 ou 2, caso seja para a EN-622-3, em princípio só poderá ser utilizada para a classe de serviço 1.

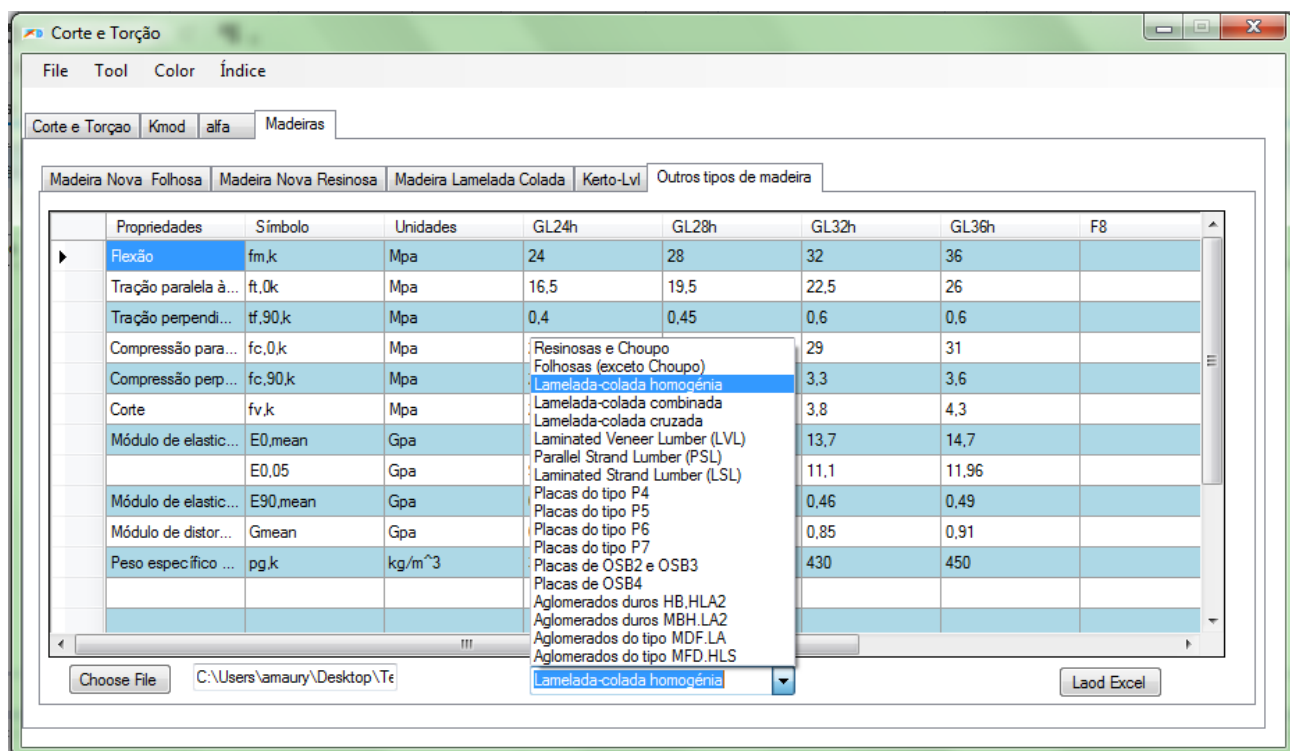


Figura 18: Tipos de madeira no programa “XDTimber”

Capítulo 4

Tração e compressão

4. TRAÇÃO E COMPRESSÃO

4.1. Tração e compressão paralelas ao fio

Para o desenvolvimento deste capítulo há que fazer uma distinção entre a madeira limpa que é usada como provetes e geralmente só é possível em pequenas dimensões e a madeira estrutural que é constituinte de peças estruturais.

Os dados obtidos experimentalmente nos ensaios com pequenos provetes traduzem uma resistência própria da madeira, pois não tem em consideração fatores que atuam sempre e de maneira intensa na natureza, tais como o crescimento, variação de espessura dos anéis, e inclinações do fio. Deste modo, é aceitável esperar que os valores da resistência dos elementos estruturais tenham valores inferiores aos da madeira limpa.

Esta redução é essencialmente perceptível para a resistência à tração pois pequenos defeitos como fendas ou nós dificultam a transmissão de esforços. No outro extremo temos as forças de compressão em que esses defeitos inerentes da madeira são muito menos perceptíveis, pois são transmissíveis através dos nós e em relação as fendas ajudam a minimizar o efeito, isto é diminuem o espaçamento entre as fendas.

Grande parte das espécies de madeira tem uma resistência à tração inferior à de compressão; paradoxalmente, os resultados dos ensaios à tração obtidos da madeira limpa são superiores aos da compressão.

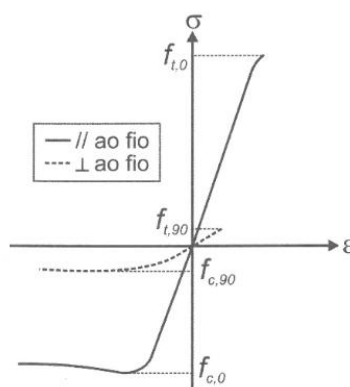


Figura 19: Curva tensão – extensão

A curva na Figura 19: Curva tensão – extensão representa a curva tensão-extensão para provetes de madeira limpa carregados sujeitos a esforços na direção do fio e na sua perpendicular. É possível verificar que o comportamento em tração paralela ao fio do provete da madeira limpa é linear até a rotura e que na rotura tem um comportamento do tipo frágil sem a ocorrência de plastificação na proximidade da zona de rotura, os valores de comportamento a tração de madeiras resinosas situam-se aproximadamente entre 80-90 N/mm².

O comportamento a compressão paralela ao fio inicialmente é de comportamento linear ao aproximar da rotura há um patamar de deformação em que é possível observar destacamento de farpas sendo que os valores para resinosas rondam 40 a 50 N/mm².

4.2. Tração e compressão perpendicular ao fio

Os provetes de madeira limpa também têm um comportamento tensão-extensão idêntico quando solicitados perpendicularmente aos da direção paralela aos fios como exemplificado na Figura 19: Curva tensão – extensão.

A rotura por tração é do tipo frágil e encontra-se numa gama de valores de 1 a 2 N/mm². Esta resistência é muito afetada pela presença de fendas e nós, deste modo apresenta grande variação de resistência em elementos estruturais.

Geralmente tem-se como prioridade evitar este tipo de esforços (tração perpendicular ao fio) adotando disposições construtivas adequadas, contudo nem sempre é possível evitar a tração, em casos como vigas curvas ou vigas de pendente dupla.

A compressão perpendicular ao fio dá origem a deformações irreversíveis quando aplicado após um troço inicial linear. Este comportamento está associado a estrutura celular da madeira.

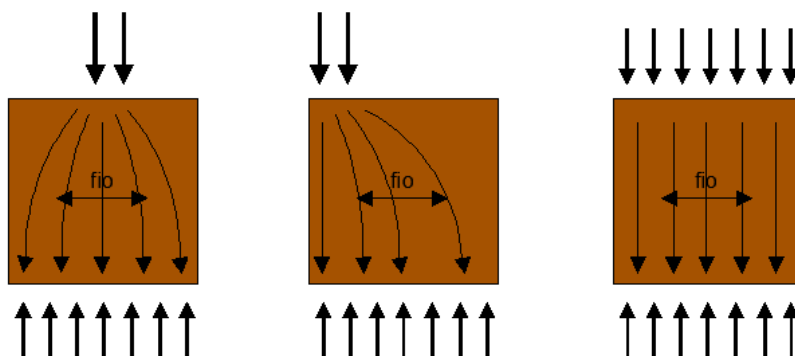


Figura 20: Resistência e rigidez (a), (b) e (c)

As resistências e rigidez sob compressão transversal são muito influenciadas pela zona de carregamento em relação ao topo e dimensão da peça, assim há possibilidade de uma maior degradação das zonas adjacentes que contribuem para a sua resistência como demonstrado na Figura 20: Resistência e rigidez (a), (b) e (c). Dependendo da localização o fator de resistência pode variar 1,75.

4.3. Tração paralela ao fio

A norma para a verificação da segurança de estruturas em madeira sujeitas a esforço de tração paralela ao fio está expressa no artigo 6.1.2(1) do EN1995-1-1.

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (4)$$

$\sigma_{t,0,d}$ o valor de cálculo da tensão atuante de tração, $f_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio. Para peças com dimensão transversal pequenas e tendo em conta o efeito do volume podemos calcular a seguinte fórmula:

$$f'_{t,0,d} = k_h \times f_{t,0,d} \quad (5)$$

Em que k_h é um coeficiente que depende diretamente da maior dimensão da peça, efeito de volume em que a probabilidade de rotura de um volume de madeira submetido a uma tensão é tanto maior quanto maior for o seu volume, não é inferior a 1 e pode ser obtido através das seguintes fórmulas e h é manifesta-se em mm.

Para madeira maciça:

$$k_h = \min \left(\left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}; 1,30 \right), h \leq 150mm \quad (6)$$

Para madeira lamelada-colada:

$$k_h = \min \left(\left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}; 1,10 \right), h \leq 600mm \quad (7)$$

Para madeira lvl:

$$k_h = \min \left(\left(\frac{3000}{l} \right)^{s/2}; 1,10 \right), h \leq 3000mm \quad (8)$$

Relativamente às fórmulas, é importante observar que o efeito de volume só atua favoravelmente em peças de pequenas dimensões. Como tal, as peças de madeira maciça devem ter um h inferior a 150 mm e para peças de madeira lamelada-colada o h deve ser inferior a 600 mm.

Na fórmula da lvl l é o comprimento da barra enquanto o s é o coeficiente definido pela seguinte fórmula:

$$s = 2 \times v - 0,05 \quad (9)$$

v só pode tomar valores inferiores a 0.10 se for esse o valor experimental obtido após 2 anos de observação e documentação, sendo esta uma exigência da norma.

4.3.1. Exercício de aplicação Tração paralela ao fio

Considere uma peça com largura e altura de 120mm constituída por madeira resinosa C16 submetido a um esforço axial de 60kN. Admita ainda que o coeficiente parcial de segurança é de 0,6 e o fator de modificação de 1,3.

4.3.1.1. Resolução manual

Cálculo do k_h :

$$k_h = \min\left(\left(\frac{150}{h}\right)^{0,2}; 1,30\right) = \left(\frac{150}{120}\right)^{0,2} = 1,05 \leq 1,30 = 1,05 \quad (10)$$

Cálculo da resistência à tração:

$$f'_{t,0,d} = k_h \frac{k_{mod}}{\gamma_M} f_{t,0,k} = 1,05 \times \frac{0,6}{1,3} \times 10 = 4,85 \text{ N/mm}^2 \quad (11)$$

Tensão atuante:

$$\frac{N_{sd}}{b \times h} = \frac{600000}{120 \times 120} = 4,17 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Verificação da segurança

$$\frac{N_{sd}}{h^2} \leq f'_{t,0,d} = 4,17 \text{ N/mm}^2 \leq 4,85 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

Para este problema verificar-se que ela satisfaz os critérios de segurança pois, a tensão resistente é superior a tensão atuante. Em seguida foi realizado o mesmo exercício utilizando o programa desenvolvido no âmbito desta tese.



Figura 21: Exercício de tração utilizando o programa “XDTimber”

4.4. Tração perpendicular ao fio

Este tipo de solicitação não é boa prática sendo que deste modo deve ser evitada, nos casos em que não se pode evitar deve ser levada em conta o efeito de volume.

4.5. Compressão paralela ao fio

Para a verificação da segurança em estruturas sujeitas a compressão paralela ao fio deve ser limitado valor de cálculo da tensão atuante de compressão ao da resistência à compressão paralela ao fio.

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (14)$$

Esta verificação não dispensa a verificação de risco de encurvadura.

4.6. Compressão perpendicular ao fio

A verificação da segurança devido a compressão perpendicular ao fio consiste em limitar o valor de cálculo da tensão atuante ao da resistência à compressão do elemento. O valor irá variar consoante a zona carregada e a geometria da peça.

O valor da resistência pode variar de $f_{d,90,d}$ até 1,75 dependendo da configuração, sendo que este valor é introduzido através de $k_{c,90}$ como se constata posteriormente:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{c,90} \times f_{t,90,d} \quad (15)$$

É de ter em cautela pois, o valor de $k_{c,90}$ pode introduzir deformações transversais de compressão da ordem de 10% deste modo pode causar problemas no desempenho das ligações.

O valor tensão atuante de compressão perpendicular ao fio é obtido recorrendo a área de contacto efetivo, A_{ef}

$$\sigma_{t,90,d} \leq \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (16)$$

A área A_{ef} é obtida expandindo o comprimento carregado cerca de um máximo de 30mm para cada lado e é o mínimo de entre o valor de a , l ou $\frac{l_1}{2}$.

Vigas continuamente apoiadas, em que $h \leq \frac{l_1}{2}$:

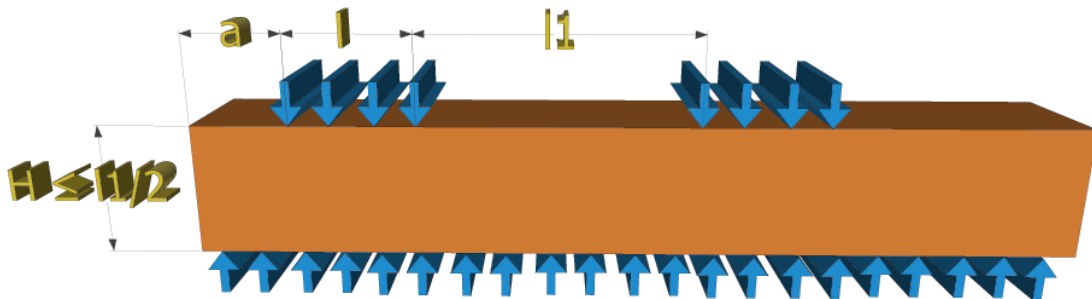


Figura 22: Vigas continuamente apoiadas

- $k_{c,90} = 1,25$ para madeira maciça de resinosas.
- $k_{c,90} = 1,50$ para madeira lamelada colada de resinosas.

Vigas com apoios discretos, em que $h \leq \frac{l_1}{2}$

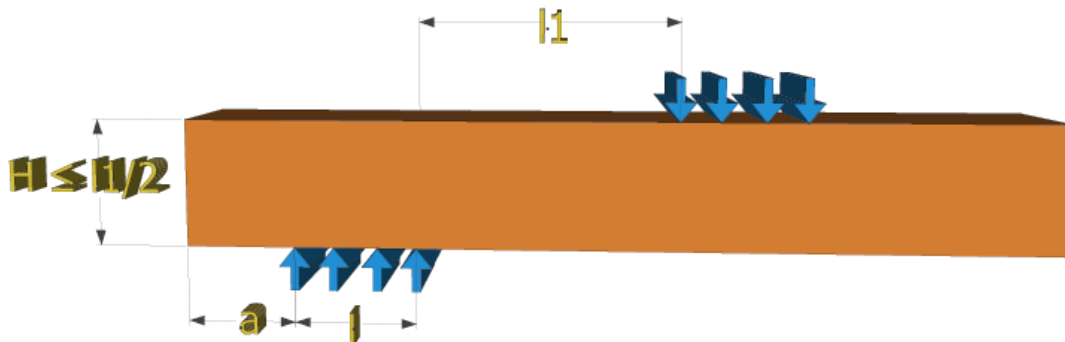


Figura 23: Vigas com apoios discretos

Em que:

- $k_{c,90} = 1,50$ para madeira maciça de resinosas.
- $k_{c,90} = 1,75$ para madeira lamelada colada de resinosas e $l \leq 400\text{mm}$

4.6.1. Exercício de aplicação compressão perpendicular ao fio

Verifique a segurança contra o esmagamento no apoio central de uma viga de dois tramos, em que a seção transversal é de $120 \times 250 \text{ mm}^2$. Considere uma ação de longa duração com classe de serviço 2. A madeira é da classe GL32h em que atua uma força de 90kN, a entrega do apoio central é de 200mm.

4.6.1.1. Resolução manual

Cálculo da resistência à compressão

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} f_{c,90,k} = \frac{0,7}{1,25} \times 3,3 = 1,85 \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

Cálculo da tensão resistente:

$$k_{c,90} \times f_{c,90,d} = 1,75 \times 1,85 = 3,24 \text{ N/mm}^2 \quad (18)$$

Segurança contra o esmagamento lateral:

$$l_{ef} = l + \Delta l_{ext} + \Delta l_{int} = 200 + 30 + 30 = 260 \text{ mm} \quad (19)$$

Cálculo da tensão atuante:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} = \frac{90000}{120 \times 260} = 2,88 \text{ N/mm}^2 \quad (20)$$

4.6.1.2. Resolução utilizando o programa XDTimber

The screenshot shows the 'Compressão perpendicular ao fio' (Perpendicular compression) window of the XDTimber software. The interface is organized into several sections:

- Compressão** (Compression): Includes tabs for 'Kmod' and 'Madeiras' (Timbers).
- Data (1)**:
 - Values (1.1)**: Input fields for $y = 120$ mm, $I = 200$ mm, and $N_{sd} = 90$ kN.
 - Exterior**: Radio button for 'I1' and a text input for 'a' set to 30 mm.
 - Interior**: Radio button for 'I1' and a text input for 'a' set to 30 mm.
- Propriedades Mecânicas (1.2)**:
 - Kmod**: Input field set to 0.7.
 - Madeira Lamelada Colada**: Dropdown menu.
 - Madeira $f_{c,90,g,k}$** : Input field set to 1.25 N/mm².
 - Madeira $f_{c,90,g,k}$** : Input field set to 3.3 N/mm².
 - Resultado**: Input field for $f_{c,90,d}$ set to 1.85 N/mm².
- Tolerância na verificação final**: Input field for percentage set to 0, and a result field showing 3.24 N/mm².
- Informação**: Text box stating 'Timber structures thesis: Amaury Silva mentor: Dr Paulo Cachim' and the 'universidade de aveiro' logo.
- Segurança no apoio (3)**:
 - Cálculo I_{ef} (3.1)**: Input fields for $\Delta_{lex,t} = 30.0$ mm, $\Delta_{lin,t} = 30.0$ mm, and $I_{ef} = 260$ mm.
 - Tensão atuante (3.2)**: Input field for $\sigma_{c,90,d}$ set to 2.88 N/mm².
 - Características da madeira (3.3)**: Radio buttons for 'vigas continuamente apoiadas' and 'vigas sobre apoios discretos' (selected). A dropdown menu shows 'Madeira lamelada' and a value of 1.75.
 - Tensão resistente (3.4)**: Input field for σ_{res} set to 3.24 N/mm². Buttons for 'verificação' and 'Verifica' are present.

The XDTIMBER logo is visible in the bottom right corner.

Figura 24: Exercício de compressão utilizando o programa “XDTimber”

Capítulo 5

Flexão

5. FLEXÃO

5.1. Flexão simples

O modelo de comportamento para as estruturas de madeira submetidas a flexão é linear elástico. o caso geral de uma secção retangular sujeitada a flexão desviada está representado na seguinte figura:

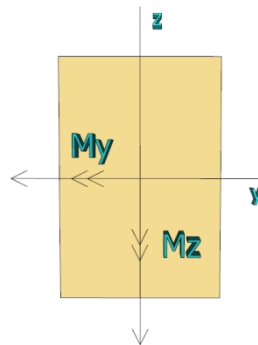


Figura 25: Flexão desviada

A distribuição das tensões para a mesma seção em que os momentos estão exercidos individualmente dá origem a tensões normais representada nas seguintes representações:

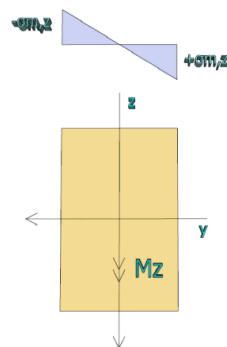


Figura 26: Flexão simples com momento segundo z

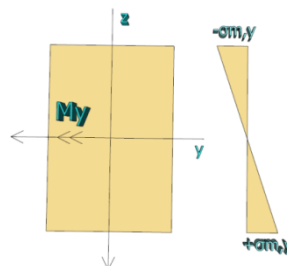


Figura 27: Flexão simples com momento segundo y

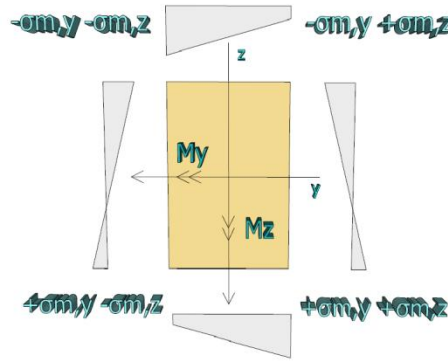


Figura 28: Flexão desviada diagramas das tensões

O critério de segurança consiste em limitar o valor máximo da tensão atuante de flexão ao valor de cálculo da resistência à flexão, em que $f_{m,d}$ é obtido recorrendo as características específicas do material.

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (21)$$

O critério de verificação da segurança de peças submetidas a flexão simples desviada admite uma redução ad hoc de uma das componentes do momento fletor; para esta situação o eurocódigo propõe uma redução, como na seguinte expressão:

$$\left\{ \left(k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \right); \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \right) \right\} \quad (22)$$

Na equação 22 $\sigma_{m,y,d}$ e $\sigma_{m,z,d}$ são os valores de cálculo das tensões máximas de flexão desviada aos momentos fletores $M_{y,d}$ e $M_{z,d}$, $f_{m,y,d}$ e $f_{m,z,d}$ são os valores das resistências à flexão nos planos xOy e xOz, que geralmente são idênticos. Para exemplos como flexão exercida em painéis de contraplacados deverão ser usados valores distintos, pois há um número de folhas distinto em cada direção; o coeficiente k_m é utilizado com o objetivo de cumprir a redução atrás mencionada. Assume o valor de 0,7 para seções retangulares e 1,0 para seções circulares pois para este último caso o valor é igual em todas as direções.

No caso particular de haver apenas um momento as expressões da fórmula equação 22 ficam simplificadas e podem ser traduzidas pela seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (23)$$

5.2. Flexão composta com tração

A metodologia de cálculo para a ação simultânea entre momento fletor e esforço axial é semelhante ao método de cálculo utilizada para a flexão simples, sendo que há acréscimo de elementos para a contribuição de esforço axial expresso na seguinte fórmula:

$$\left\{ \left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \right); \left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \right) \right\} \quad (24)$$

$\sigma_{t,0,d}$ e $f_{t,0,d}$ são os valores de cálculo da tensão atuante e resistência ao esforço axial de tração na direção do fio. Os restantes elementos da equação 24 são iguais aos elementos da equação 22.

5.3. Flexão composta com compressão

Paralelamente à linha de pensamento da Flexão composta com tração e devido ao facto das curvas tensões-extensões não serem lineares para a compressão, é utilizada uma interação quadrática para o caso de flexão composta com compressão, como na seguinte fórmula:

$$\left\{ \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \left(k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \right); \left(\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \right) \right\} \quad (25)$$

É possível verificar graficamente, através da seguinte Figura 29: Gráfico da flexão composta com compressão.

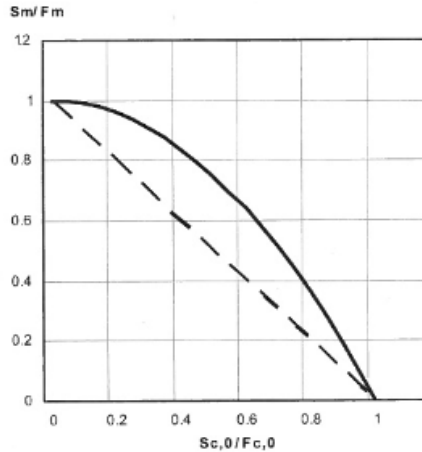


Figura 29: Gráfico da flexão composta com compressão

O caso de flexão simples em que há somente um dos elementos do momento fletor e tendo em conta a verificação de segurança é traduzido através da seguinte expressão:

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (26)$$

5.3.1. Segurança contra o bambeamento

O fenómeno de bambeamento (instabilidade lateral-torsional) ocorre nas vigas esbeltas com flexão no eixo forte; é caracterizado pela maneira como se deforma, pois há deslocamentos transversais ao plano da carga que são acompanhados de torção na secção, como se pode verificar nas seguintes figuras. Na primeira não há bambeamento e a seguinte apresenta bambeamento.

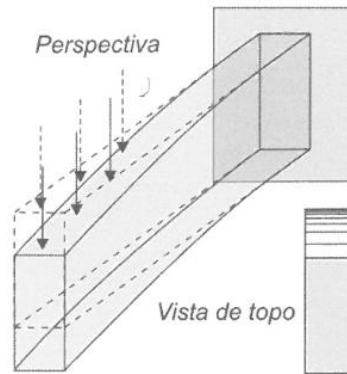


Figura 30: Consola sem bambeamento (Negrão)

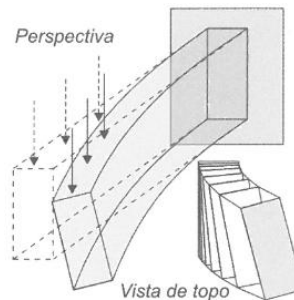


Figura 31: Consola com bambeamento (Negrão)

A distribuição normal de tensões que dão origem a momentos expressas nas seguintes figuras mostra que a metade inferior da secção da consola está submetida a tensões de compressão. Corresponde ao modelo escora-tirante, que é suscetível à encurvadura.

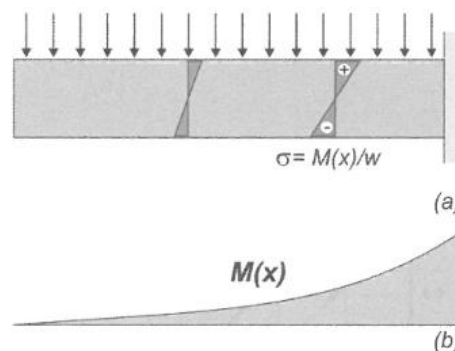


Figura 32: Distribuição de tensões em consola (Negrão)

O banzo tracionado é estável (banzo superior) e exerce um efeito de travamento sobre o comprimido (banzo inferior) através de montantes e diagonais correspondentes às zonas centrais ou alma da viga real, contudo no plano perpendicular ao carregamento não há travamento, possibilitando deste modo a ocorrência de encurvadura nessa direção.

Na viga real o travamento transversal será proporcionado pela rigidez de flexão transversal da viga pelo que é tanto menor quanto mais esbelta for o elemento, deste modo o fenómeno de bambeamento pode ser caracterizado como a encurvadura do banzo comprimido da viga.

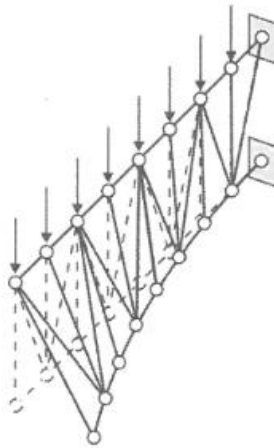


Figura 33: Consola com encurvadura (Negrão)

5.3.2. Cálculo do momento crítico elástico

O momento crítico é o valor do momento fletor máximo para o qual a viga entra em bambeamento para um determinado carregamento assim como para uma determinada condição de apoio.

Tendo como exemplo uma viga com apoio simples submetida a flexão pura o cálculo do momento crítico corresponde a seguinte expressão:

$$M_{crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \sqrt{E \times I_z \times I_{tor} \times G} \quad (27)$$

Em que:

- E é o módulo de elasticidade do material;
- I_z é o momento de inércia em relação ao eixo fraco z;
- G é o módulo de distorção;
- I_{tor} é o momento de inércia de torção da secção;
- l_{ef} é o comprimento efetivo de bambeamento, dependendo do tipo de carregamento e das condições de apoio

Para o caso correspondendo a elementos esbeltos em que a instabilidade tem lugar em regime elástico, a tensão crítica correspondente será dada pela expressão:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{crit}}{W} = \frac{\pi}{l_{ef} \times W} \sqrt{E \times I_z \times I_{tor} \times G} \quad (28)$$

Para elementos estruturais tais como a madeira, em que as propriedades mecânicas obedecem a uma lei de variação probabilística, devem ser utilizados valores correspondentes aos quantilhos de 5% para E e G.

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{crit}}{W} = \frac{\pi}{l_{ef} \times W} \sqrt{E_{0,05} \times I_z \times I_{tor} \times G_{0,05}} \quad (29)$$

Para os parâmetros usuais utilizados nas dimensões dos elementos em madeira retangulares verifica-se que $\frac{E_{0,05}}{G_{0,05}} = 16$; assim pode ser deduzida a seguinte fórmula de forma conservadora:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times E_{0,05} \times b^2}{h \times l_{ef}} \quad (30)$$

5.3.3. Fator de momento uniforme equivalente

O caso mais desfavorável de carregamento corresponde à Figura 34: Fator de momento equivalente em que todas as secções estão submetidas ao momento máximo. Nos casos em que nem todas as secções estão submetidas ao esforço máximo a instabilização ocorrerá para valores de momento crítico superiores aos Figura 34: Fator de momento equivalente.

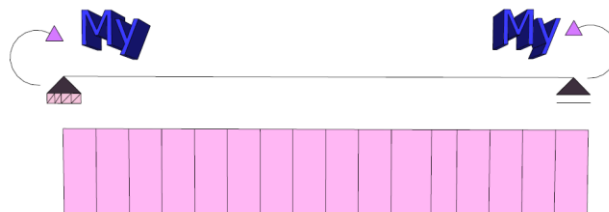


Figura 34: Fator de momento equivalente

Esses aspetos são tidas em conta na equação 29 e 30 mediante o seu comprimento efetivo de bambeamento, l_{ef} que é obtida recorrendo a um fator para alterar o comprimento real de um fator de momento uniforme equivalente. Está relacionada com a forma do diagrama de momentos, sendo que por sua vez está relacionada com as condições de apoio.

Este fator representa a relação que deve existir entre o vão de uma viga com uma determinada distribuição de momentos fletores e o de outra com uma distribuição semelhante ao apresentado na Figura 34: Fator de momento equivalente; outro processo é adaptar o rácio $1/m$ entre a tensão

crítica de uma viga submetida a um carregamento definido e a mesma viga apresentada Figura 34: Fator de momento equivalente.

Para o diagrama mais desfavorável temos assim a equação 31, que corresponde à menor tensão crítica de bambeamento, em que l é o vão da viga

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times E_{0,05} \times b^2}{h \times m \times l_{ef}}$$

(31)

Propostas para valores de m :

Carregamento	Forma do diagrama	m
		1,00
		0,57
		0,43
		0,74
		0,88
		0,96
		0,69
		0,59
		0,39

Figura 35: Valores de m

Tipo de viga	Carregamento	$m=l_0/l$
Simplesm. apoiada	Momento constante	1,0
	Carga unif. distribuída	0,9
	Força a meio vão	0,8
Consola	Carga unif. distribuída	0,5
	Força na extremidade	0,8

NOTA: O rácio l_0/l é válido para uma viga com a rotação de torção restringida nos apoios e com a carga (descendente, por hipótese) aplicada na linha definida pelos centros geométricos das secções. Se a carga for aplicada na face superior, l_0 deverá ser aumentado de $2h$, devendo ser reduzido de $0,5h$ para uma carga suspensa da face inferior.

Figura 36: Valores de m simplificado

5.3.4. Efeito do ponto de aplicação

A suscetibilidade ao bambeamento é simultaneamente afetada pelo ponto de aplicação da carga, na secção transversal. Caso o carregamento atue na parte superior, vai originar uma torção o que resultante na instabilização da viga, assim há uma excentricidade δ em relação à linha de ação, um momento adicional que tende a agravar a torção. Contrariamente, se a carga for suspensa na parte inferior, a instabilidade resultante dá origem a um momento que é estabilizador. Caso a aplicação da força seja no centro geométrico da secção, esta tem uma função neutra, no contexto em estudo.

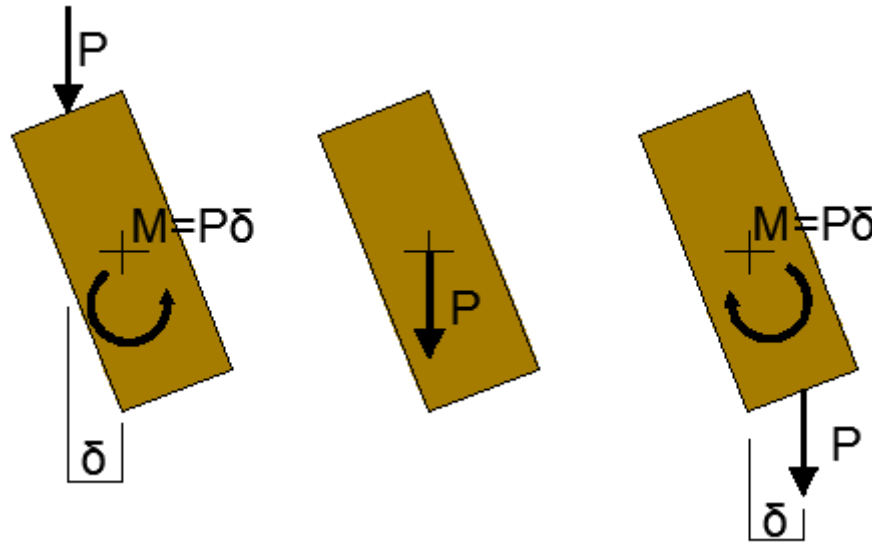


Figura 37: Efeito do ponto de aplicação superior

5.4. Verificação regulamentar

A metodologia da verificação da segurança para o risco de bambeamento, recomendada EN1995-1-1, consiste em limitar o valor de cálculo da tensão atuante de flexão a uma fração k_{crit} do valor da resistência a flexão da madeira em estudo, como pode ser averiguada na fórmula 32:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \quad (32)$$

k_{crit} é obtida através da curva de bombeamento, a qual é estabelecida analiticamente no EN-1995-1-1 em termos de esbelteza e que pode ser obtida recorrendo à seguinte fórmula:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{f_{m,k} / \sigma_{m,crit}} \quad (33)$$

A curva é circunscrita por troços, nas seguintes condições:

$$k_{crit} = 1 \dots se \dots \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \quad (34)$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} \dots se \dots 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,40 \quad (35)$$

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \dots se \dots \lambda_{rel,m} \geq 1,40 \quad (36)$$

Os troços laterais caracterizam diferentes modos de rotura enquanto o troço intermédio faz uma transição entre eles. Para peças com baixa esbelteza relativa, tais como vigas de pequeno vão e ou secção compacta, não há ocorrência de bambeamento antes do esgotamento da resistência a flexão. Desta forma, o modo de rotura à flexão é a que prevalece, sendo que se deve considerar $k_{crit} = 1$. Para vigas de grande vão e ou secção esbeltas em que $h \gg b$, a rotura é originada pelo bambeamento da viga. Podemos verificar a curva de bambeamento através da seguinte figura:

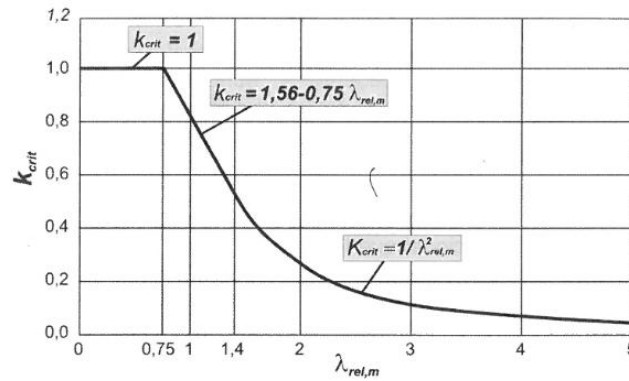


Figura 38: Gráfico da curva de bambeamento

5.4.1. Bambeamento em flexão composta

A força de tração tem uma influência positiva relativamente ao fenómeno de bambeamento, isto é, tem um efeito estabilizador, pelo que a metodologia usada relativamente a flexão composta com tração será caracterizada conservadoramente como até este ponto.

A flexão composta com compressão não era explícita no EN1995-1-1, sendo que originava dificuldades de dimensionamento de elementos como arcos e pernas das asnas, em que há grande influência destes estados de tensão.

Para este efeito é proposto que:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (37)$$

O primeiro elemento traduz a parcela correspondente à contribuição da flexão. Os significados dos símbolos do primeiro termo são iguais aos casos de flexão simples; o segundo termo corresponde ao efeito de esforço axial onde:

- $\sigma_{c,d}$ – Valor de cálculo da tensão atuante de compressão
- $k_{c,z}$ – Valor de cálculo da resistência à compressão na direção do fio
- $f_{c,0,d}$ – Coeficiente de encurvadura no plano xOy

5.4.2. Mitigação do risco de Bambeamento

Na presença de um elevado risco de bambeamento, devem ser tomadas medidas mitigadoras desse género de risco; uma redução de risco significa um aumento do valor da tensão crítica para a estrutura e carregamento dados. Através da análise à equação 31 é possível constatar que as medidas atenuadoras podem ser atingidas de várias formas:

- Aumento do módulo de elasticidade do material
- Aumento da largura da secção transversal do elemento
- Redução da altura da secção transversal
- Redução do comprimento efetivo de bambeamento

A primeira opção possivelmente seria de excluir visto que implica uma mudança de material, o que se torna uma medida desproporcionada.

O aumento da largura assim como da diminuição da sua altura podem ser atingidos colocando a secção ao baixo. A eficiência mecânica será menor e com risco de ser insuficiente para garantir a necessária resistência pretendida, sendo que outro aspeto é a ocorrência de uma maior deformação.

Desta maneira, a colocação do elemento ao baixo ocorre não somente por características estruturais como para ocultar talões de vigas em lajes.

O aumento da largura e da secção pode representar desperdício proporcional de material, visto que a secção em estudo já representaria a necessária capacidade de suporte das cargas solicitadas. No último ponto é sugerida a redução do comprimento efetivo, esta pode ser alcançada por um travamento contínuo ou discreto do banzo comprimido da viga que é suscetível à instabilização.

5.4.3. Travamento

Esta função é conseguida naturalmente pelos sarrafos ou tábuas de solho no caso de pavimentos simplesmente apoiados nas quais o banzo comprimido é superior, como se poder verificar nas seguintes figuras.

Esta função é conseguida naturalmente pelos sarrafos ou tábuas de solho no caso de pavimentos simplesmente apoiados nas quais o banzo comprimido é superior, como se poder verificar nas seguintes figuras.

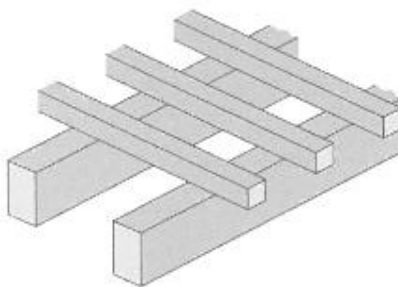


Figura 39: Travamento recorrendo a sarrafos (Negrão)

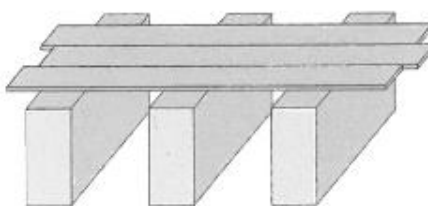


Figura 40: Travamento recorrendo aos soalhos (Negrão)

No caso de consolas o travamento deverá ser efetuado por elementos específicos para o efeito visto que o banzo comprimido é inferior; pode ser assegurado por tarugos transversais, cabos ou bielas.

Outra medida para mitigar o risco de bambeamento é a fixação dos apoios, impedindo estes de torcer já que o fenómeno de bambeamento é a conjugação de flexão transversal e torção, na construção tradicional esta medida é certificada pela inserção da viga nas paredes de alvenaria, enquanto que, para o caso de construções novas deve ser realizada a pormenorização para reforço necessário no apoio, como podemos verificar na seguinte figura.

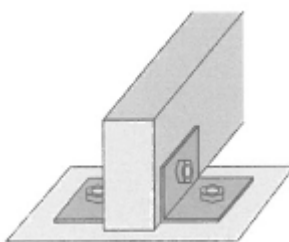


Figura 41: Travamento recorrendo aos apoios (Negrão)

Para o caso de vigas isoladas será necessário prever um travamento discreto. O procedimento é igual ao travamento dos pilares em que os pontos em que são aplicados os travamentos dividem o elemento.

A força de travamento deve ser calculada para a combinação de ação mais desfavorável como ilustra a seguinte figura:

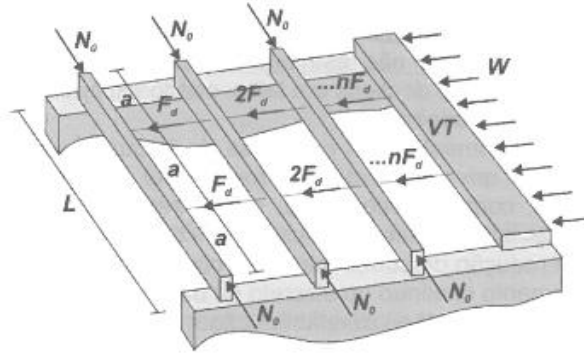


Figura 42: Forças estabilizadoras contra o bambeamento (Negrão)

O travamento lateral de vigas ou treliças associadas em treliças de elementos paralelos tais como pavimentos, estão descritas na cláusula 9.2.53, contudo o ponto (1) determina a necessidade de criar um sistema de travamento (VT) capaz de suportar efeitos de outras ações, tais como a ação do vento, como é possível ver na figura anterior.

Por cada viga e por cada elemento de travamento temos a seguinte expressão de cálculo:

$$F_d = k_L \times \frac{a \times N_d}{k_{f,s} \times L} \quad (38)$$

Em que:

- L é o vão da viga
- A é o espaçamento entre elementos de travamento (L/2)
- N_d é o valor de cálculo do esforço normal de compressão
- k_L e $k_{f,3}$ são coeficientes.

No caso de o elemento ter uma seção retangular, deve ser utilizada para obter o valor de N_d a equação 39.

$$N_d = (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d}{h} \quad (39)$$

Onde:

- H é a altura da seção transversal da viga
- M_d é o valor de cálculo do momento atuante
- k_{crit} é o coeficiente de bambeamento do elemento

O coeficiente k_L é obtido pela seguinte expressão:

$$k_L = \min \left(1; \sqrt{\frac{15}{L}} \right) \quad (40)$$

5.4.4. Exercício de aplicação flexão

Verifique a segurança de um elemento com largura de 100 mm e 250 mm de altura, constituído por madeira folhosa do tipo D50 submetido a carga constante de 4 kN/m. Admita que a ação é de longa duração e classe de serviço 2.O elemento tem uma vão de 5 m.

5.4.4.1. Resolução manual

Cálculo da resistência a flexão:

$$f_{m,d} = k_h \times \frac{k_{\text{mod}} \times f_{m,k}}{\gamma_M} = 23,08 \text{ N/mm}^2 \quad (41)$$

Cálculo do momento fletor atuante:

$$M_{sd} = \frac{Q_{sd} \times l^2}{8} = \frac{4 \times 5^2}{8} = 12,5 \text{ kNm} \quad (42)$$

Cálculo da tensão atuante:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{W} = \frac{6 \times M_{sd}}{y \times z^2} = \frac{6 \times 12,5 \times 10^6}{100 \times 250^2} = 12,0 \text{ N/mm}^2 \quad (43)$$

Comprimento de Cálculo:

$$l_{ef} = m \times l = 0,9 \times 5000 + 2 \times 250 = 5000 \text{ mm} \quad (44)$$

Cálculo da tensão crítica:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times E_{0,05} \times y^2}{h \times l_{ef}} = \frac{0,78 \times 14000 \times 100^2}{250 \times 5000} = 87,36 \text{ N/mm}^2 \quad (45)$$

Cálculo do $\lambda_{rel,m}$:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{f_{m,k} / \sigma_{m,crit}} = \sqrt{\frac{50}{87,36}} = 0,76 \quad (46)$$

Cálculo do k_{crit} :

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} = 0,993 \quad (47)$$

Cálculo da tensão resistente:

$$k_{crit} \times f_{m,d} = 0,993 \times 23,08 = 22,85 \text{ N/mm}^2 \quad (48)$$

5.4.4.2. Resolução utilizando o programa XDTimber

Flexão

File Tool Color Índice

Flexão Travamento Knod Madeiras

Dados (1)

Valores (1.1)

y 100 mm

z 250 mm

l 5 m

q 4 kN/m

Propriedades Mecânicas (1.2)

kmod 0,6

Madeira maciça 1,3 m

Madeira fm,k 50 N/mm²

E0,05 14000 N/mm²

Fator de resistência do sistema (1.3)

k_{sys} 1

Efeito de volume (1.4)

kh 1

Cálculo de resistências (2)

Valor de cálculo da resistência do sistema (2.1)

f_{m,d} 23,08 N/mm²

Bambeamento (2.2)

m 0,9

☒ Carga na face superior

☐ Carga na face inferior

l_{ef} 5000 mm

Verificações (3)

Tensão atuante (3.1)

M_{sd} 12,5 kNm

σ_{m,d} 12 N/mm²

Esbelteza relativa (3.2)

σ_{m,crit} 87,36 N/mm²

λ_{rel,m} ,76

k_{crit} ,99

Tensão resistente (3.3)

22,849 N/mm²

Verificação Verifica

Tolerância na verificação final

0 %

22,849 N/mm²

Timber structures
thesis: Amaury Silva
mentor: Dr Paulo Cachim

universidade de aveiro

XDTIMBER

Figura 43: Exercício de Flexão utilizando o programa “XDTimber”

Capítulo 6

Corte e torção

6. CORTE E TORÇÃO

6.1. Verificação ao corte

A madeira é um material anisótropo. Desde modo, a sua resistência depende do plano em que ela é solicitada. Caso a solicitação seja paralelo às fibras a rotura por corte surge devido ao escorregamento que irá surgir entre as várias fibras. Para o caso em que a madeira é solicitada perpendicularmente às fibras a rotura por esforço de corte irá ocorrer devido ao corte das fibras. O valor mínimo para a resistência é obtido quando as solicitações paralelo as fibras e o valor máximo do esforço transversor é alcançado quando a rotura acarreta o corte das fibras. Neste último caso as tensões são superiores relativamente as tensões do corte por escorregamento.

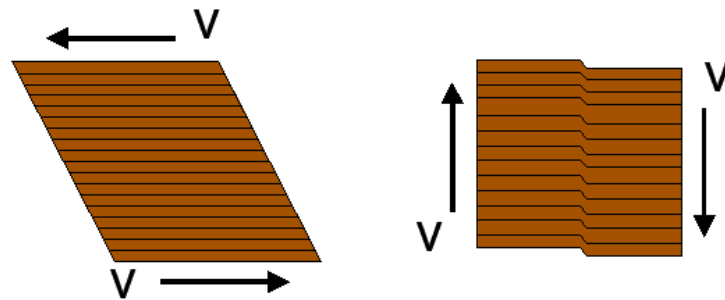


Figura 44: Corte paralelo ao fio

Na resistência dos materiais é definida a rotura por corte como uma rotura de natureza frágil, deste modo não há lugar a plastificação assim o modo da distribuição de tensão é expressa pela seguinte fórmula em que V é o esforço transversor, S é o momento estático, b é a largura da secção e I é o momento segundo o eixo baricêntrico.

Distribuição de tensões segundo a resistência dos materiais:

$$\tau_v = \frac{VS}{Ib} \quad (49)$$

Quando a secção é retangular a variação de tensão tangencial atinge o seu valor máximo a meia secção a expressão que define o seu comportamento é uma lei de variação parabólica:

Tensão máxima obtida a meia secção:

$$\tau_v = \frac{3V}{2A} \quad (50)$$

A verificação da segurança ao corte de elementos de madeira consiste em delimitar a tensão atuante de corte à tensão resistência de corte da madeira, esta verificação traduz-se pela seguinte expressão:

Verificação da segurança ao corte:

$$\tau_v \leq f_{v,d} \quad (51)$$

No caso em que a estrutura sujeitas a flexão deve ser considerada uma diminuição da área para levar em conta o efeito das fendas, neste sentido é estabelecido que:

Largura reduzida da seção:

$$b_{ef} = k_{cr} \times b \quad (52)$$

- $k_{cr} = 0.67$ para madeira maciça
- $k_{cr} = 0.67$ para madeira lamelada colada
- $k_{cr} = 1.00$ para outros derivados da madeira

Na proximidade de apoios as forças transversais transmitem-se sobretudo por biela de compressão ou tração deste modo as forças transversais podem deixar de ser contabilizadas desde que se situem a uma determinada distância do apoio, esta distância esta definida 2 vezes h sendo que h é a altura ilustrada na seguinte figura

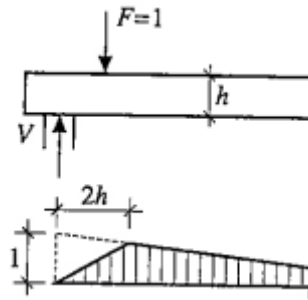


Figura 45: Proximidade do apoio

Concentração de tensões em entalhes:

O aparecimento de concentração de tensões nas proximidades das zonas de entalhes, na face tracionada junto a elementos com flexão, pode agravar os riscos no caso de vigas com secção retangular, para mitigar esses riscos é aplicado um coeficiente redutor k_{v0} . Este coeficiente pode ser considerado igual a 1 quando a tração ou compressão for paralelo ao fio, quando o entalhe na face tracionada da viga com $i \geq 10$ e por ultimo quando o entalhe se encontra na face comprimida da viga.

Verificação de tensões seção retangular:

$$\tau_{v,m\acute{a}x} \leq k_v \times f_{v,d} \quad (53)$$

Em que:

$$k_v = \min \left[1; \frac{k_n \left(1 + \frac{1,1 \times i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha) + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}} \right)} \right] \quad (54)$$

- i é a tangente do ângulo β , definido pelo plano de transição com a vertical.
- α rácio entre h_e/h entre a altura reduzida da secção e a normal.
- x –distância entre a raiz do entalhe e a secção teórica de apoio (definida pela posição teórica de apoio)
- k_n coeficiente dependente do material da viga (4.5 LVL; 5.0 madeira maciça; 6.5 madeira lamelada colada)

6.2. Verificação à torção

Não há grandes estudos relativamente ao comportamento deste material quando afetada por esforço de torção e também a madeira não é um material especialmente bom para resistir a este tipo de solicitações, pois quando ocorrem há desfibramento da madeira. Visto que a resistência à torção é em geral superior a resistência ao corte, podemos ter como limite a resistência ao corte para a resistência torção, isto para efeitos de dimensionamento segundo o EN1995-1-1.

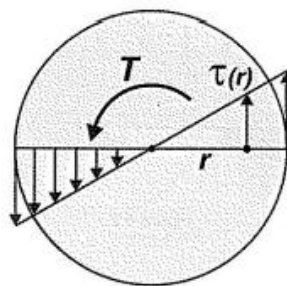


Figura 46: Seção circular submetida à torção

Nas secções circulares a determinação das tensões é efetuada recorrendo à Figura 46: Seção circular submetida à torção pois pela resistência dos materiais na determinação das tensões tangenciais de torção só é necessária a hipótese da axisimetria da peça então temos que:

$$\tau = \frac{T_r}{I_p} = \frac{2T}{\pi \times r^3} \quad (55)$$

- T é o momento torção
- I_p momento polar da inércia
- r distancia do ponto considerado ao centro da peça

No caso de seções retangulares a teoria utilizada é o da elasticidade sendo que o valor máximo das tensões ocorre no contorno da peça e rege-se pela equação 56 que está dependente do rácio entre $h/b = 1$

$$\tau_{máxv} = \frac{T}{\alpha h b^2} \quad (56)$$

A verificação da segurança a torção utilizada no EC5 é a equação 55 em que $\tau_{tor,d}$ é o valor de cálculo da tensão tangencial atuante, $f_{v,d}$ é o valor da resistência ao corte da madeira e k_{shape} é o coeficiente de forma da seção que para as seções circulares é igual a 1.2 e para as retangulares é

igual $\min\{1 + 0,15 \times \frac{h}{b}; 2,0\}$

$$\tau \leq k_{shape} f_{v,d} \quad (57)$$

6.3. Verificação à torção e corte

A interação conjunta e simultânea das forças de torção e de corte são raras em estruturas de madeira, contudo é necessário precaver, pois um dos pontos críticos da seção quando atuada pelo esforço de torção também é a mesma para o esforço transversal, deste modo deve ser utilizado a fórmula de Mohler-hemmer.

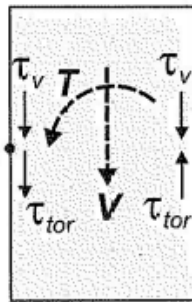


Figura 47: Interação corte e torção

Verificação da segurança Corte e torção:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{f_{tor,d}} + \left(\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (58)$$

6.3.1. Exercício de aplicação corte e torção

Verifique a segurança de um elemento com dimensões largura 100 mm de altura 200 mm, constituído por madeira folhosa do tipo D40 submetido a um esforço cortante de 15 kN e esforço de torção de 1 kNm. Considere a ação de média duração e classe de serviço 1.

6.3.1.1. Resolução manual

Propriedades da madeira:

$$f_{v,d} = \frac{k_{\text{mod}} \times f_{v,k}}{\gamma_M} = 2,34 \text{ N/mm}^2 \quad (59)$$

Esforço cortante:

$$\tau_{v,d} = \frac{3}{2} \times \frac{V_{sd}}{bh} = 1,125 \text{ N/mm}^2 \quad (60)$$

Determinação do alfa:

$$\frac{z}{y} = 1,0 \quad (61)$$

$$\alpha = 0,208 \quad (62)$$

Esforço torsor:

$$\tau_{tor,d} = \frac{T}{\alpha h b^2} = 2,4 \text{ N/mm}^2 \quad (63)$$

Verificação da segurança:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{f_{tor,d}} + \left(\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \right)^2 = \frac{0,703}{0,9} + \left(\frac{0,6}{0,9} \right)^2 = 1,26 \leq 1 = KO! \quad (64)$$

6.3.1.2. Resolução utilizando o programa XDTimber

The screenshot shows the 'Corte e Torção' (Shear and Torsion) window of the XDTimber program. It is divided into several sections:

- Dados (1) - Valores (1.1):** Input fields for y = 100 mm and z = 200 mm.
- Propriedades Mecânicas (1.2):** Input for Kmod = 0.8, a dropdown for 'Madeira maciça', a value of 1.3, and a value of 3.8 N/mm². The result for Fv.g.d is 2.34 N/mm².
- Tensões Atuantes (2) - Corte (2.1):** Input for Vsd = 15000 N. The result for TVD is 1.13 N/mm².
- Tensões Atuantes (2) - Torção (2.3):** Input for T = 1000000 Nmm and α = 0.208. The result for t Tor.d is 2.4 N/mm².
- Verificação de Segurança (3):** A result of 1.26 is shown, with buttons for 'Verificação' and 'Não verifica'.
- Tolerância na verificação final:** Two input fields showing 0 % and 1.26.
- Informação:** A box containing the text 'Timber structures thesis: Amaury Silva mentor: Dr Paulo Cachim' and the logo of the University of Aveiro.

Figura 48: Exercício de corte e torção utilizando o programa “XDTimber”

6.3.2. Exercício de aplicação Viga com entalhe

Verifique a segurança de uma viga com dimensões largura 150 mm e altura 250 mm em que nos apoios tem largura 150 mm e 150 mm de altura, constituído por madeira lamelada colada do tipo GL24h submetido a um esforço cortante de 7 kN/m. Considere a ação de longa duração e a classe de serviço 1. A viga tem 4 m de vão e $i = 0$.

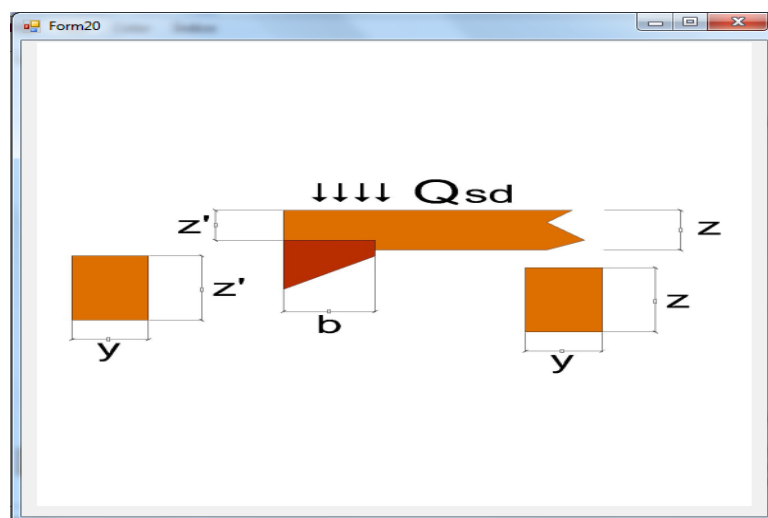


Figura 49: Ilustração da viga com entalhe no programa “XDTimber”

6.3.2.1. Resolução manual

Propriedades da madeira:

$$f_{v,d} = \frac{k_{\text{mod}} \times f_{v,k}}{\gamma_M} = 1,3 \text{ N/mm}^2 \quad (65)$$

Esforço cortante:

$$F_{v,d} = Q_{sd} \left(\frac{L}{2} - \frac{b}{2} \right) = 7 \left(\frac{4}{2} - \frac{0,1}{2} \right) = 13,65 \text{ kN} \quad (66)$$

Tensão tangencial:

$$\tau_{v,d} = \frac{3}{2} \times \frac{V_{sd}}{bh} = \frac{3}{2} \times \frac{13,65 \times 10^3}{150 \times 150} = 0,91 \text{ N/mm}^2 \quad (67)$$

Cálculo do coeficiente alfa:

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h} = \frac{150}{250} = 0,6 \quad (68)$$

Distância ao centro:

$$x = \frac{b}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ m} \quad (69)$$

Características da madeira Lvl:

$$k_n = 6,5 \quad (70)$$

Fator de segurança kv:

$$k_v = \min \left[1; \frac{k_n \left(1 + \frac{1,1 \times t^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \right] = 0,423 \quad (71)$$

Verificação da segurança:

$$\tau_{d,m\acute{a}x} = 0,91 \text{ N/mm}^2 \leq k_v f_{v,d} = 0,84 \times 1,3 = 1,092 \text{ N/mm}^2 \text{ OK!} \quad (72)$$

6.3.2.2. Resolução utilizando o programa XDTimber



Figura 50: Exercício de Viga com entalhe utilizando o programa “XDTimber”

Capítulo 7

Pilares e encurvadura

7. PILARES E ENCURVADURA

Sendo um material normalmente mais focalizado para resistir às solicitações do esforço de flexão, contudo é possível utilizar a madeira para a realização de pilares, asnas, estacas, consoante as necessidades. Podem ser peças simples, circulares ou retangulares dependendo do esforço que estão sujeitas.

A encurvadura é um fenómeno que provoca uma deformação transversal numa barra comprimida. Quando uma barra está sujeita a um esforço de compressão, visto que nas peças reais existem defeitos de fabrico ou imperfeições geométricas, essas imperfeições originam uma flexão na barra que agrava as imperfeições iniciais da estrutura, este fenómeno pode atenuar ou acentuar essas mesmas imperfeições.

Os momentos que advém das imperfeições e que agravam as deformações, são designadas por efeitos de segunda ordem. Quando o valor da força de compressão atinge um determinado valor, carga crítica, a deformação aumenta rapidamente e origina o colapso da estrutura.

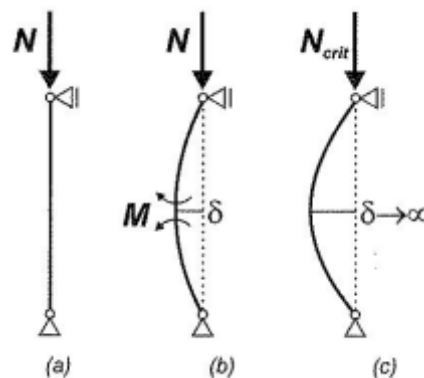


Figura 51: Fenómeno de encurvadura

A determinação da curva de encurvadura depende da esbelteza que é relacionada com a carga última da peça.

7.1. Esbelteza

O comportamento dos pilares face às ações que os solicitam depende em grande medida da sua esbelteza, ou seja, a relação entre o comprimento efetivo e o raio de giração

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad (73)$$

Temos então que:

- l_0 representa o comprimento efetivo de encurvadura, isto é, a distância entre pontos de momento nulo ou pontos de inflexão da configuração deformada
- i representa o raio de giração da secção, tal que $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ em que i é o momento de inércia da secção segundo o eixo perpendicular ao plano de encurvadura e A a área da secção transversal

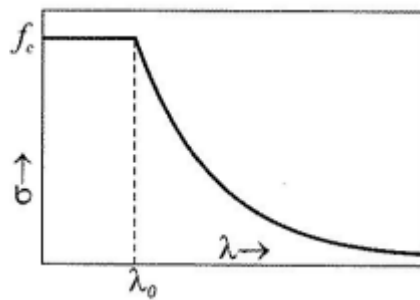


Figura 52: Curva de encurvadura

A curva de encurvadura é constituída por dois tramos díspares, até a esbelteza λ_0 , na zona de secções compactas ou barras curtas não existe risco de encurvadura logo a rutura dá-se por esmagamento zona reta do gráfico. Por outro lado quanto maior a esbelteza maior é a instabilidade. O valor intermédio de entre os dois valores que separam as duas linhas de rutura pode ser obtido

$$\lambda_0 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_c}} \quad (74)$$

7.2. Verificação regulamentar

A verificação da segurança à encurvadura tem pré-requisitos pois é necessário conhecer previamente, caso das dimensões das secções e dos cálculos que daí advêm tais como raio de giração, área, as condições de apoio.

O procedimento de cálculo de segurança deve ser conduzida simultaneamente em dois planos perpendiculares a peça sendo que para tal deve ser definido as esbeltezas; λ_y e λ_z :

$$\lambda_y = \frac{l_{v,y}}{i_y} \quad (75)$$

$$\lambda_z = \frac{l_{v,z}}{i_z} \quad (76)$$

Esbeltezas relativas:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (77)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (78)$$

A dispensa da verificação da encurvadura será dispensável se ambas as esbeltezas relativas forem inferiores a 0.3, pois são valores para peças compactas que não sofrem instabilização.

Quando uma ou mais são superiores a 0.3 é necessário verificar o risco de encurvadura, por ser um fenómeno que ocorre em peças esbeltas, é imprescindível ter em conta a interação entre os momentos e esforço axial de compressão as fórmulas de interação linear segundo o EC5 são:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (79)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (80)$$

- Os valores de σ são valores de tensões normais de compressão e de flexão
- Os valores de f são os correspondentes valores da resistência
- k_m coeficiente que introduz redução devendo ser 0.7 para secções retangulares
- $k_{c,y}$ e $k_{c,z}$ são coeficientes de encurvadura.
- $\sigma_{c,0,d}$, $\sigma_{m,y,d}$, $\sigma_{m,z,d}$ são valores de cálculo das tensões normais)

Coeficientes $k_{c,y}$ e $k_{c,z}$:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_{rel,y}^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (81)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_{rel,z}^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (82)$$

Coefficientes k_y e k_z :

$$k_y = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) \quad (83)$$

$$k_z = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) \quad (84)$$

$$\beta_c \begin{cases} \text{para madeira maciça} & 0,2 \\ \text{para madeira lamelada colada} & 0,1 \end{cases} \quad (85)$$

7.3. Comprimento de encurvadura

Estes comprimentos baseiam-se na teoria de Euler, estabilidade elástica. Para uma barra com reduzidas condições de ligação, como a espaço entre pontos de inflexão ou momentos nulo da configuração deformada correspondente à instabilização no plano considerado.

Os valores do comprimento de encurvadura são obtidos em função da barra e das condições de apoio e são representadas pelas seguintes figuras sendo que as três primeiras encontram-se contraventadas e as seguintes não se encontram contraventadas:

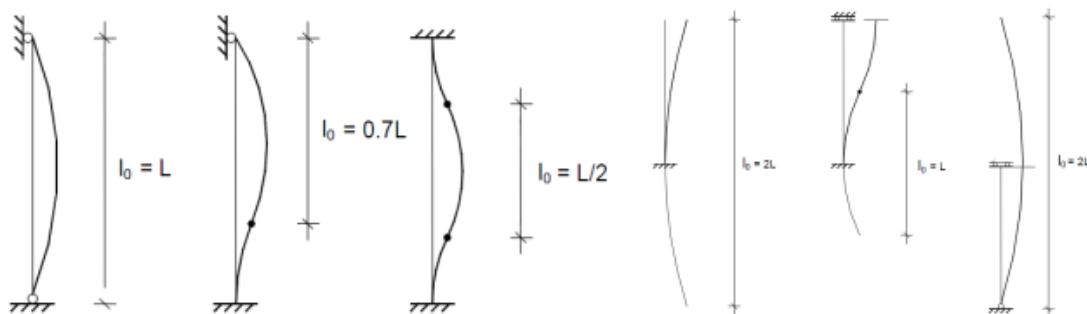


Figura 53: Comprimentos de encurvadura (Meneses, 2012)

7.3.1. Exercício de aplicação pilares e encurvadura

Verifique a segurança de um elemento com dimensões transversal de largura 300 x 250 mm² e com 8 m de altura, constituído por madeira lamelada colada do tipo GL32c submetido a uma força de compressão de 150 kN e carga uniforme em ambas as direções de 5 kN/m. Admita que a ação é de media duração de classe 2. O elemento tem 8 m de altura. Considere que a barra encontra-se encastrada em ambas as extremidades.

7.3.1.1. Resolução manual

Cálculo da área:

$$A = 300 \times 250 = 75000 \text{ mm}^2 \quad (86)$$

Cálculo do I_z e I_y :

$$I = \frac{y \times z^3}{12}; I_y = 390625000 \text{ mm}^4; I_z = 562500000 \text{ mm}^4 \quad (87)$$

Cálculo do i_z e i_y :

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}; i_y = 72,169 \text{ mm}; i_z = 86,603 \text{ mm} \quad (88)$$

Tensão de compressão:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{G_{sd}}{A} = \frac{150000}{75000} = 2 \text{ N/mm}^2 \quad (89)$$

Cálculo do M_{sd} :

$$M_{sd,y} = \frac{Q_{sd,z} L^2}{12} = \frac{5 \times 8^2}{12} = 26,667 \text{ kNm} \quad (90)$$

Cálculo do W_y e W_z :

$$W = \frac{b \times h^2}{6}; W_y = 3125000 \text{ mm}^3; W_z = 3750000 \text{ mm}^3 \quad (91)$$

Tensão de flexão:

$$\sigma = \frac{M_{sd}}{W_y}; \sigma_{m,y,d} = 8,533 \text{ N/mm}^2; \sigma_{m,z,d} = 7,111 \text{ N/mm}^2 \quad (92)$$

Propriedades da madeira:

$$f_{m,d} = \frac{k_{\text{mod}} \times f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \times 32}{1,2} = 20,48 \text{ N/mm}^2 \quad (93)$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{\text{mod}} \times f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \times 29}{1,2} = 18,56 \text{ N/mm}^2 \quad (94)$$

Encurvadura em y e em z:

$$\lambda = \frac{L_v}{i}; \lambda_y = \frac{4000}{72,169} = 55,425; \lambda_z = \frac{4000}{86,603} = 46,188 \quad (95)$$

Esbelteza relativa em y e em z:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \left(\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}} \right)^{0,5} = \frac{46,188}{\pi} \left(\frac{29}{13,7 \times 10^3} \right)^{0,5} = 0,812 \quad (96)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \left(\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}} \right)^{0,5} = \frac{55,425}{\pi} \left(\frac{29}{13,7 \times 10^3} \right)^{0,5} = 0,6764 \quad (97)$$

A verificação do risco de encurvadura será dispensado quando ambas as esbeltezas relativas forem inferiores a 0,3, ou seja é preciso fazer a verificação da encurvadura.

Coefficiente k_y e k_z :

$$k_y = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) \quad (98)$$

$$k_y = 0,5 \left(1 + 0,1(0,812 - 0,3) + 0,812^2 \right) = 0,854 \quad (99)$$

$$k_z = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) \quad (100)$$

$$k_z = 0,5 \left(1 + 0,1(0,676 - 0,3) + 0,676^2 \right) = 0,748 \quad (101)$$

Coefficiente $k_{c,y}$ e $k_{c,z}$:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,85 + \sqrt{0,85^2 - 0,812^2}} = 0,91 \quad (102)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75^2 - 0,677^2}} = 0,93 \quad (103)$$

Verificação da segurança xy e xz :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (104)$$

$$\frac{2}{0,91 \times 18,56} + \frac{8,5}{20,48} + 0,7 \times \frac{7,1}{20,48} = 0,776 \leq 1 \dots OK! \quad (105)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (106)$$

$$\frac{2}{0,93 \times 18,56} + 0,7 \times \frac{8,5}{20,48} + \frac{7,1}{20,48} = 0,75 \leq 1 \dots OK! \quad (107)$$

7.3.1.2. Resolução utilizando o programa XDTimber

The screenshot displays the XDTimber software interface for calculating timber columns. The interface is organized into several panels with input fields and calculated results.

Pilar (Tab: **Kmod**, **Madeiras**)

Dados (1)

Secção (1.1)

y	300	mm
z	250	mm
h	8	m

Forças (1.2)

Nsd	150	kN
Gsd,y	5	kN/m
Gsd,z	5	kN/m

Fator de modificação (1.3)

rectangular 0,7 Km

Madeira lamelada colada 0,1 Bc

Propriedades Mecânicas

Valores de cálculo (1.4)

Madeira Lamelada Colada 1,25 γm

Kmod 0,8

E0,05 13700 N/mm²

Madeira fv,k 32 N/mm²

fc,0,k 29 N/mm²

Força de cálculo (1.5)

fm,d	20,48	N/mm ²
fc,0,d	18,56	N/mm ²

Características geométricas da secção (2)

Área	75000	mm ²
Iy	390625000	mm ⁴
Iy	72,17	mm
Iz	562500000	mm ⁴
Iz	86,6	mm

Valores de cálculo das tensões actuais (3)

Compressão (3.1)

σc,0,d	2	N/mm ²
--------	---	-------------------

Flexão (3.2)

Msd,y	26,7	kNm
Msd,z	26,7	kNm
W _y	3125000,0	mm ³
W _z	3750000,0	mm ³
σm,y,d	8,5	N/mm ²
σm,z,d	7,1	N/mm ²

Risco de encurvadura (4)

Lv,y 4 m

Lv,z 4 m

Esbelteza

Coefficientes de Esbelteza (4.1)

λ _y	55,4
λ _z	46,2

Coefficientes de Esbelteza Relativos (4.2)

λ _{rel,y}	,811
λ _{rel,z}	,677

Verificação (4.3)

é necessário fazer verificação específica

é necessário fazer verificação específica

Verificação Especifica (5)

Cálculos

Coefficientes Ky e Kz (5.2)

K _y	,85
K _z	,75

Coefficientes Kc,y e Kc,z (5.3)

K _{c,y}	,91
K _{c,z}	,93

Verificação (5.4)

,776 Verifica

Verificar

,753 Verifica

Tolerância na verificação final

0 %

1

informação

Timber structures
thesis: Amaury Silva
mentor: Dr Paulo Cachim

universidade de aveiro

Figura 54: Exercício de pilares e encurvadura utilizando o programa “XDTimber”

Capítulo 8

Vigas curvas

8. VIGAS CURVAS

8.1. Introdução

Devido ao efeito provocado pelas forças de desvio a distribuição de tensões de flexão nas peças de geometria curva ou inércia variável é não-linear. Neste caso o eixo neutro da peça desloca-se em direção à parte inferior da peça sendo que aí atinge o seu máximo, o que origina uma distribuição de forças com a forma hiperbólica enquanto na parte superior é caracterizada por uma distribuição linear elástica.

Esta diferença entre os dois valores está relacionada com a face superior e o fio da madeira, α_{ap} no cume, este parâmetro é igual ao ângulo da pendente em todas as direções excetuando as vigas curvas de seção constante, raio da curvatura referido à linha média da viga (r) assim como a altura da seção transversal h_{ap} .

8.2. Tensões de flexão geral

Na atual versão do eurocódigo EC5-1-1 não é levado em conta o agravamento das tensões de flexão no canto inclinado, assim as tensões de flexão são adquiridas recorrendo à seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{k_{c,z}f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (108)$$

$$\sigma_{m,0,d} = \sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad (109)$$

Em que:

- $\sigma_{m,0,d}$ e $\sigma_{m,\alpha,d}$ são os valores da tensão atuante de cálculo na parte inferior, paralelas ao fio e na superior α inclinação com o fio
- M_d valor de cálculo dado momento fletor em que b e h são respetivamente a largura e altura da seção.

8.3. Tensões atuantes de flexão no cume

O desvio existente na zona da cumeeira perturba o regime de tensões existentes nessa secção, deste modo é importante ter em consideração o coeficiente de modificação das tensões que são obtidas pelo teorema das peças lineares.

Para elementos em que a viga possui dupla pendente com extradorso, a divisão dessa zona é igual a metade da altura da seção do cume h_{ap} , para cada um dos lados como podemos certificar posteriormente.

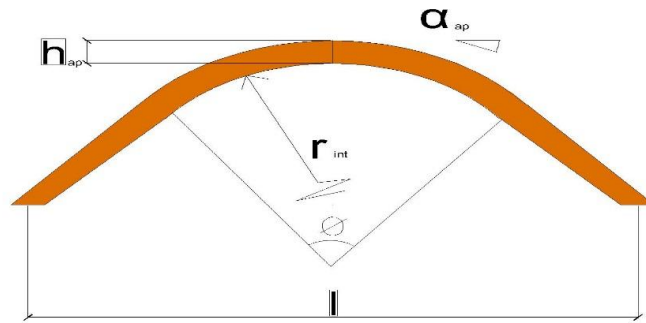


Figura 55: Viga curva

Para estruturas com outra tipologia a dimensão é coincide com o troço curvo, contudo para este caso o volume é limitado a 2/3 do volume total da viga. O valor de cálculo da tensão atuante de flexão no cume deve ser determinado recorrendo à seguinte expressão.

$$\sigma_{m,d} = k_l \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} \quad (110)$$

Em que:

- $M_{ap,d}$ corresponde ao valor de cálculo do momento fletor atuante na secção do cume
- k_l é o coeficiente de modificação da distribuição linear
- k_l obtida recorrendo a seguinte expressão:

$$k_l = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3 \quad (111)$$

Em que:

- r é o raio de curvatura da linha média, na secção do cume estando relacionada com o raio do intradorso, r_{int}

$$r = r_{int} + \frac{h_{ap}}{2} \quad (112)$$

k_1 é dada pela seguinte expressão:

$$k_1 = 1 + 1,4 \operatorname{tg} \alpha_{ap} + 5,4 \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} \quad (113)$$

k_2 é dada pela seguinte expressão:

$$k_2 = 0,35 + 8 \operatorname{tg} \alpha_{ap} \quad (114)$$

k_3 é dada pela seguinte expressão:

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \operatorname{tg} \alpha_{ap} - 7,8 \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} \quad (115)$$

k_4 é dada pela seguinte expressão:

$$k_4 = 6 \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} \quad (116)$$

8.4. Tensões resistentes de flexão geral

Nas zonas fora da pendente dupla para as vigas de pendente simples a resistência à flexão das fibras não paralela ao fio da madeira que para estes casos geralmente são na parte superior está relacionado com o ângulo força-fio das tensões de flexão α_{ap} , assim para que a verificação da segurança seja garantida a seguinte expressão tem que ser válida.

$$\sigma_{m,\alpha d} \leq k_{m,\alpha} f_{m,d} \quad (117)$$

Em que:

- $f_{m,d}$ é o valor de cálculo da resistência à flexão
- $\sigma_{m,\alpha d}$ é o valor de cálculo da tensão atuante de flexão obtida pela equação 108
- $k_{m,\alpha}$ coeficiente que está relacionado com o ângulo força-fio assim como o sinal das tensões na face inclinada. Devido ao efeito do vento estas podem sofrer inversão de sinal visto que correspondem a tensões de compressão em que a ação é a gravítica.

$k_{m,\alpha}$ para as tensões de compressão deve-se recorrer à equação 119:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 f_{v,d}} \operatorname{tg} \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \operatorname{tg}^2 \alpha \right)^2}} \quad (118)$$

$k_{m,\alpha}$ para as tensões de tração pode ser obtido recorrendo a equação 120:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0,75 f_{v,d}} \operatorname{tg} \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \operatorname{tg}^2 \alpha \right)^2}} \quad (119)$$

Em que os componentes são:

- $f_{v,d}$ valor de cálculo da resistência ao corte
- $f_{c,90,d}$ valor de cálculo da resistência à compressão
- $f_{t,90,d}$ valor de cálculo da resistência à tração

Na face paralela ao fio, a verificação da segurança relativamente à flexão segue os trâmites normais para peças lineares.

8.5. Tensões resistentes de flexão no cume

O processo de produção de vigas curvas consiste em impor uma determinada curvatura às lamelas e posteriormente proceder à sua colagem para essa geometria.

Este processo de produção dá origem a tensões de flexão que permanece na peça final como tensões residuais.

Dependendo do valor de tensão de flexão das lamelas é viável reduzir a importância das mesmas, sendo que essas tensões estão relacionadas com o modo de produção, tais como o raio de curvatura imposto assim com a rigidez de flexão, como podemos ver a seguir.

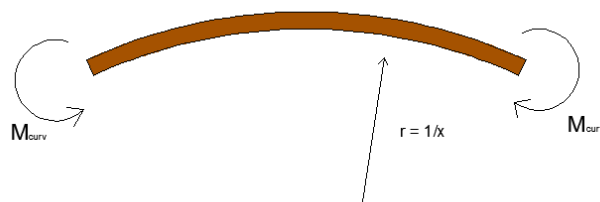


Figura 56: Lamela submetida a momentos de extremidade

A figura 61 representa uma lamela que está submetida a momentos de extremidade M_{curv} , que dão origem a um estado de flexão pura ou circular no elemento, como podemos constatar na seguinte expressão:

$$\sigma_{m,curv} = \frac{M_{curv}}{W} = \frac{EIx}{W} = \frac{6Ebt^2}{12bt^2r} = \frac{EI}{2r} \quad (120)$$

Em que:

- r é o raio de curvatura
- $x=1/r$ representa a curvatura da secção
- b é a largura
- t é a altura

- ω é o módulo de flexão
- I é o momento de inércia

Através da equação 119 é possível constatar que as tensões originadas através das lamelas são inversamente proporcionais à espessura das lamelas, por esse facto geralmente são utilizadas lamelas com espessuras entre 10 a 15 mm para curvaturas de pequenos raios. O eurocódigo prevê essa situação e desse modo foi introduzido um coeficiente de redução da resistência por efeito de curvatura das lamelas, k_r , que é relevante no critério de verificação da segurança.

$$\sigma_{m,d} \leq k_r f_{m,g,d} \quad (121)$$

k_r pode ser obtido recorrendo à seguinte expressão:

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{se } r_{in}/t \geq 240 \\ 0,76 + \frac{0,001 r_{in}}{t} & \text{se } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (122)$$

Onde r_{int} corresponde ao raio de curvatura do intradorso

8.6. Tensões perpendiculares ao fio

8.6.1. Fundamentação

Nas vigas e nas vigas de pente dupla, a mudança da direção do eixo do elemento na zona do cumee origina forças de desvio T . É possível ainda ter momento fletor a provocar trações na face côncava ou mesmo na reta da viga, como é possível constatar na seguinte figura.

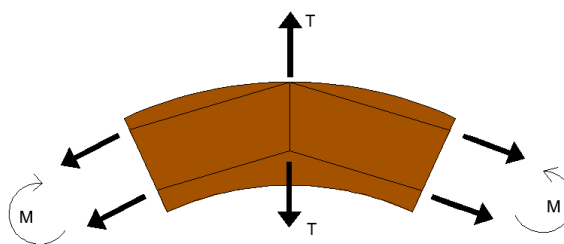


Figura 57: Mudança de direção na zona do cumee

Essas forças provocam tensões de tração perpendicular ao fio com uma distribuição parabólica ao longo da altura da secção transversal, como se pode verificar na seguinte figura:

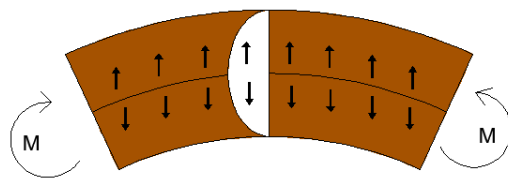


Figura 58: Tração perpendicular ao fio

Devido à diminuída resistência que a madeira possui para esse tipo de esforço é possível a ocorrência de rotura por tração transversal, que pode ter consequências potencialmente graves, como a representada seguinte figura:

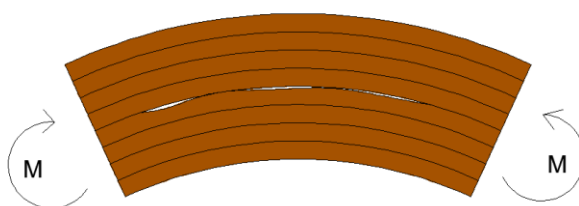


Figura 59: Rotura por tração transversal

A mitigação deste fenómeno passa pela utilização de armaduras transversais ou pela limitação do valor das tensões de tração perpendiculares ao fio, como exemplificado na próxima figura:

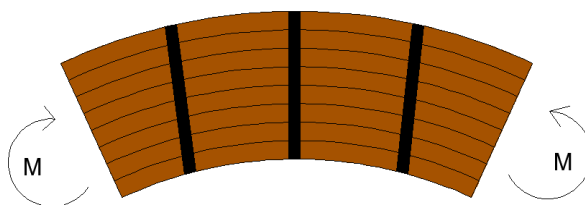


Figura 60: Armaduras transversais

8.7. Disposições regulamentares

8.7.1. Tensão atuante perpendicular ao fio

Para a definição dos valores de cálculo da tensão atuante de tração perpendicular ao fio deve ser modificado o valor da tensão de flexão do cume como explícito na cláusula 6.4.3(8) do eurocódigo; para peças de forma lineares deve ser utilizada o coeficiente k_p , como é possível constatar posteriormente:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{b \times h_{ap}^2} \quad (123)$$

Equação 122 traduz o efeito da compressão perpendicular ao fio produzido por uma carga p_d sendo este o valor uniforme aplicado na face superior e na zona do cume, sendo que b é a largura da seção transversal. Podemos constatar que:

$$0,6 = \frac{P_d}{b} \quad (124)$$

O coeficiente k_p está relacionada com α_{ap} e do raio da curvatura da linha média; para a sua determinação deve ser utilizada a seguinte fórmula:

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 \quad (125)$$

k_5 é dado por:

$$k_5 = 0,2 \operatorname{tg} \alpha_{ap} \quad (126)$$

k_6 é obtido por:

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \operatorname{tg} \alpha_{ap} + 2,6 \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} \quad (127)$$

k_7 é obtido recorrendo à fórmula posterior:

$$k_7 = 2,1 \operatorname{tg} \alpha_{ap} - 4 \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} \quad (128)$$

8.7.2. Resistência à tração perpendicular ao fio

O processo de verificação de segurança reside em comparar a tensão atuante com a resistência à tração perpendicular ao fio da zona do cume, como pode ser observado na seguinte expressão:

$$\sigma_{t,90,d} = k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d} \quad (129)$$

Em que:

- $f_{t,90,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração perpendicular ao fio
- k_{dis} é um coeficiente relacionado com a topologia da viga, assumindo o valor de 1,7 para vigas curvas com extradorso formando cume e 1,4 para os restantes casos
- k_{vol} é o fator de volume

k_{vol} pode ser obtido recorrendo à equação 131:

$$k_{vol} = \begin{cases} 1 & \text{para madeira maciça} \\ \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} & \text{para madeira lamelada colada} \end{cases} \quad (130)$$

Em que:

- V_0 é o volume de referência correspondente a $0,01\text{m}^3$
- V é o volume da zona do cume limitado a $2/3$ do volume total da viga

Na eventualidade de existir simultaneamente tração perpendicular ao fio e corte, deve ainda ser verificada a seguinte cláusula 6.4.3(7) do EC5-1-1:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (131)$$

Em que τ_d e $f_{v,d}$ são iguais respetivamente aos valores de cálculo da tensão atuante de corte e da resistência ao corte do material.

8.7.3. Exercício de aplicação vigas curvas

Verifique a segurança de uma viga curva com seção transversal de 400 mm, constituído por madeira lamelada coleada do tipo GL28h submetido a uma carga uniforme de 3 kN/m em todo o vão que tem 15 m de comprimento. Admita que a ação é de curta duração e classe de serviço 1. O raio interno é de 40 m, considere ainda que as lamelas têm 0,03 m de espessura e a seção do cume tem 2 m

8.7.3.1. Resolução manual

Propriedades de cálculo da madeira $f_{t,90,g,d}$:

$$f_{t,90,g,d} = \frac{k_{mod} \times f_{t,90,g,k}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \times 0,45}{1,25} = 0,324 \text{ N/mm}^2 \quad (132)$$

Propriedades de cálculo da madeira $f_{m,g,d}$:

$$f_{m,g,d} = \frac{k_{mod} \times f_{m,g,k}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \times 28}{1,25} = 20,16 \text{ N/mm}^2 \quad (133)$$

Momento atuante na zona do cume:

$$M_{ap,d} = \frac{Q_{s,d} L^2}{8} = \frac{3 \times 15^2}{8} = 84,38 \text{ kNm} \quad (134)$$

Curvatura:

$$r = r_{\text{int}} + \frac{h_{ap}}{2} = 40 + \frac{2}{2} = 41m \quad (135)$$

Coefficiente k_1 :

$$k_1 = 1 + 1,4tg\alpha_{ap} + 5,4tg^2\alpha_{ap} = 1 + 1,4tg0 + 5,4tg^20 = 1 \quad (136)$$

Coefficiente k_2 :

$$k_2 = 0,35 + 8tg\alpha_{ap} = 0,35 + 8tg0 = 0,35 \quad (137)$$

Coefficiente k_3 :

$$k_3 = 0,6 + 8,3tg\alpha_{ap} - 7,8tg^2\alpha_{ap} = 0,6 + 8,3tg0 - 7,8tg^20 = 0,6 \quad (138)$$

Coefficiente k_4 :

$$k_4 = 6tg^2\alpha_{ap} = 6tg^20 = 0 \quad (139)$$

Fator de cálculo k_l :

$$k_l = k_1 + k_2\left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3\left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + k_4\left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3 \quad (140)$$

$$k_l = 1 + 0,35\left(\frac{2}{41}\right) + 0,6\left(\frac{2}{41}\right)^2 + 0 = 1,019 \quad (141)$$

Tensão atuante na zona do cume:

$$\sigma_{m,d} = k_l \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} = 1,019 \frac{6 \times 84,375}{0,4 \times 2^2} = 322,26 kN/m^2 = 0,322 N/mm^2 \quad (142)$$

Verificação a segurança na zona do cume:

$$\sigma_{m,d} = 0,322 N/mm^2 \leq k_r f_{m,g,d} = 1 \times 0,415 N/mm^2 \text{ OK!} \quad (143)$$

Verificação da segurança à flexão no cume:

$$\sigma_{m,d} = 0,322 N/mm^2 \leq k_r f_{m,g,d} = 1 \times 20,16 N/mm^2 \text{ OK!} \quad (144)$$

Coeficiente k5:

$$k_5 = 0,2tg\alpha_{ap} = 0,2tg0 = 0 \quad (145)$$

Coeficiente k6:

$$k_6 = 0,25 - 1,5tg\alpha_{ap} + 2,6tg^2\alpha_{ap} = 0,25 - 1,5tg0 + 2,6tg^20 = 0,25 \quad (146)$$

Coeficiente k7:

$$k_7 = 2,1tg\alpha_{ap} - 4tg^2\alpha_{ap} = 2,1tg0 - 4tg^20 = 0 \quad (147)$$

Fator de cálculo kp:

$$k_p = k_5 + k_6\left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7\left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 = 0 + 0,25\left(\frac{2}{41}\right) + 0 = 0,012 \quad (148)$$

Tensão atuante de tração perpendicular ao fio no cume:

$$\sigma_{m,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} = 0,012 \frac{6 \times 84,375}{0,4 \times 2^2} = 3,859 kN/m^2 = 0,0039 \quad (149)$$

Verificação da segurança devido à tração perpendicular no cume:

$$\sigma_{t,90,d} = 0,0039 N/mm^2 \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d} = 1,7 \times 0,24 \times 0,324 = 0,132 N/mm^2 \quad (150)$$

8.7.3.2. Resolução utilizando o programa XDTimber

The screenshot shows the 'Vigas curvas' (Curved Beams) software interface. It is organized into several sections for data entry and calculation:

- Dados (1):**
 - Carga (1.1):** Q_{ad} = 3 kN/m
 - Estrutura (1.2):**
 - L = 15 m
 - r_{int} = 40 m
 - α_{av} = 0 °
 - h_{av} = 2 m
 - b = 0.4 m
 - t = 0.03 m
 - e = 20 °
- Propriedades mecânicas (1.3):**
 - Madeira Lamelada Colada:**
 - K_{mod} = 0.9
 - $f_{m,90,g,k}$ = 1.25 N/mm²
 - $f_{m,g,k}$ = 0.45 N/mm²
 - $f_{m,g,k}$ = 28 N/mm²
- Propriedades de cálculo (1.4):**
 - $f_{c,90,g,d}$ = .32 N/mm²
 - $f_{m,g,d}$ = 20.16 N/mm²
- Verificação da resistência a flexão na zona do cume (2):**
 - Momento atuante de cálculo na secção do cume (2.1):** $M_{ap,d}$ = 84.38 kNm
 - Cálculo de r (2.2):** r = 41 m
 - Cálculo de k (2.3):**
 - k_1 = 1
 - k_2 = .35
 - k_3 = .6
 - k_4 = .000
 - Cálculo do k_l (2.4):** k_l = 1.02
 - Tensão atuante de flexão (2.5):** $\sigma_{m,d}$ = .32 N/mm²
 - Fator de redução da tensão resistência de flexão por curvatura das lamelas (2.6):** k_r = 1
- Verificação da segurança à flexão na zona do cume (3):**
 - Formula: $k_r \cdot f_{m,g,d}$ = 20.16
 - Button: Verifica
- Verificação da resistência a tração perpendicular ao fio na zona do cume (4):**
 - Radio buttons: ☐ vigas curvas com extradorso, ☒ outros casos
 - Parâmetro k_{dis} (4.1):** k_{dis} = 1.7
 - Parâmetro k_{vol} (4.2):**
 - ☐ Madeira maciça
 - ☒ Madeira lamelada colada
 - V = 11.449
 - k_{vol} = .244
- Tensão atuante de tração perpendicular ao fio (5):**
 - $\sigma_{t,90,d}$ = .004 N/mm²
- Resistência (6):**
 - Formula: $k_{vol} \cdot k_{dis} \cdot f_{t,90,d}$
 - Value: .13 N/mm²
 - Button: Verifica
- Tolerância na verificação final:**
 - Value: 0 %
 - Value: .13
- Informação:**
 - Logo: XDTIMBER
 - Text: Timber structures thesis: Amaury Silva mentor: Dr Paulo Cachim
 - Logo: universidade de aveiro

Figura 61: Exercício de vigas curvas utilizando o programa “XDTimber”

Capítulo 9

Ligações Pregadas

9. LIGAÇÕES PREGADAS

9.1. Pregos

Os mais antigos e banalizados de entre os ligadores são os pregos. Estes apresentam vários tamanhos, secções e acabamento, sendo o mais comum de entre eles o prego de cabeça circular de diâmetro duplo do pescoço. Outro tipo de pregos geralmente utilizados são os pregos lisos de secção quadrada, que apresentam maior resistência comparativamente aos pregos redondos.

Os pregos anelar são constituídos por uma superfície lateral rugosa que assegura um melhor comportamento ao arranque e dificulta a ocorrência de fendas na madeira.



Figura 62: Pregos com incisões anelares

Outro tipo de pregos são os helicoidais, que têm os mesmos propósitos que os pregos apresentados anteriormente mas apresentam ainda maior resistência mecânica, pois o aço utilizado na sua conceção é endurecido por efeito de torção imposta ao arame original de secção quadrada.



Figura 63: Pregos helicoidais

Há uma gama muito variada de dimensões para pregos, como podemos ver na Figura 75. As dimensões estão discriminadas na figura 76

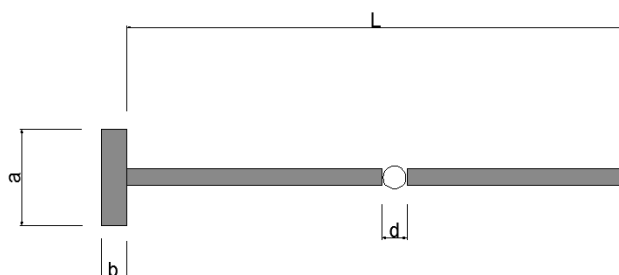


Figura 64: Dimensões do prego

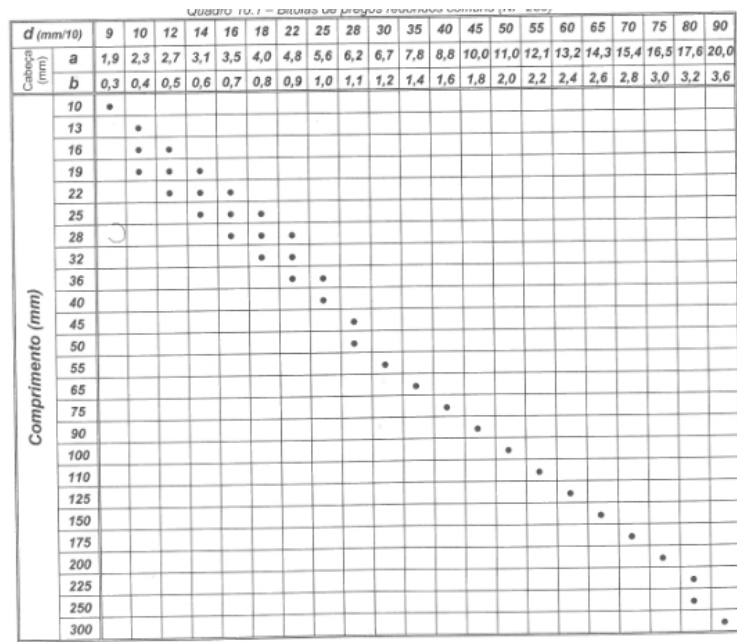


Figura 65: Bitolas de pregos redondos (Negrão, 2009)

Os pregos são concebidos geralmente em aço maciço e a sua resistência à tração tem como mínimo 600 Mpa, sendo que este é o valor mínimo exigido no eurocódigo. Há contudo pregos em aço inoxidável, latão e alumínio para serem utilizados em trabalhos específicos.

A pregagem pode ser realizada diretamente sobre a madeira ou com recurso a meios auxiliares, tais como as chapas de aço que permitem realizar uma perfuração plana, como pode ser verificado na figura seguinte.



Figura 66: Esquema de ligações

Quando não há uma preparação prévia que anteceda a perfuração é relevante ter em conta que há risco de fratura da madeira. Este risco é tanto maior quanto maior for o diâmetro do prego, na realização deste processo a penetração do prego faz-se por separação das fibras.

Como medida para mitigar este risco pode ser realizada um furo prévio, sendo este realizado com perfuração com prego de menor diâmetro. Ao ser utilizado este procedimento há uma diminuição do risco de fratura e consequentemente há a possibilidade de reduzir o espaçamento entre pregos, para além de melhorar a capacidade de carga lateral.

O eurocódigo impõe que seja realizada pré-furação da madeira quando a massa volúmica desta seja superior a 500 Kg/m^3 ou quando o diâmetro do prego for superior a 6 mm. O procedimento anterior deve ainda ser utilizado nos casos em que a pregagem seja madeira-madeira e em que as peças tenham espessuras inferiores às fornecidas na equação 152:

$$t = \max \left\{ \frac{7d}{(13d - 30) \frac{\rho_k}{400}} \right\} \quad (151)$$

Onde:

- D é o diâmetro do prego em mm
- ρ_k é o valor característico da massa volúmica da madeira em Kg/m^3

Quando solicitado ao corte, o funcionamento do prego é otimizado quando a aplicação é realizada na direção perpendicular, como podemos verificar na seguinte figura; não obstante pode ser utilizado em outras configurações mediante algumas restrições.



Figura 67: Solicitações na ligação

- Os pregos lisos submetidos a forças de arranque permanentes ou de longa duração não podem ser considerados resistentes
- Os pregos aplicados no topo das peças em que a direção do fio seja paralela devem ser considerados incapazes de suportar essas solicitações
- pregos lisos cuja aplicação seja em elementos de estrutura secundárias têm uma resistência que deve ser considerada $1/3$ da resistência dos mesmos quando aplicados perpendicularmente ao fio

9.1.1. Pregos ao corte

A resistência ao esmagamento dos pregos e outros tipos de ligadores é dada por fórmulas empíricas do eurocódigo, e dependem de ser com ou sem pré-furação.

Pregos aplicados sem pré-furação:

$$f_{h,1,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \quad (152)$$

Pregos aplicados com pré-furação:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k \quad (153)$$

Em que:

- ρ_k é o valor característico da massa volúmica da madeira em kg/m^3
- d é o diâmetro do prego expressa em mm

É necessário ter em conta que estas expressões não são válidas para pregos cujo diâmetro seja superior a 8 mm; caso seja superior devem ser aplicadas as fórmulas para as cavilhas e parafusos de porcas.

O momento plástico pode ser comparado semelhantemente ao utilizado na construção metálica, sendo que o ligador vai trabalhar como se fosse uma viga submetida a tensões exercidas pela madeira. Estas tensões podem provocar uma rótula plástica, que corresponde ao limite da capacidade de resistência à flexão, ilustrada posteriormente.



Figura 68: Rotura plástica

O momento plástico é o momento fletor instalado, como podemos ver na figura anterior.

Para a resistência à tração para pregos e arames o eurocódigo propõe as seguintes expressões empíricas, sendo que as resistências não podem ser inferiores a $600 \text{ N}/\text{mm}^2$:

Para pregos redondos:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_u d^{2,6} \quad (154)$$

Para pregos quadrados:

$$M_{y,Rk} = 0,45 f_u d^{2,6} \quad (155)$$

Onde:

- d é o diâmetro dos pregos redondos ou a dimensão do lado, para casos em que seja considerado os pregos quadrados, expressa em mm
- $M_{y,Rk}$ é expressa em Nmm

9.1.2. Pregos ao arranque

O modo que os pregos têm de resistir ao arranque é diferente do modo de resistir ao corte, sendo assim há uma distinção entre a abordagem de ambos. Nos pregos solicitados ao arranque pode haver dois modos de cedência, uma em que há perda de aderência e por consequência uma separação da peça que recebe a ponta do prego, outro em que há rotura por punçoamento da peça na qual se encontra ancorada a cabeça do prego, como podemos ver nas seguintes figuras.

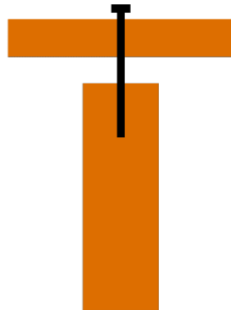


Figura 69: Pregos ao arranque a)

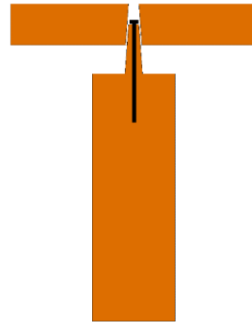


Figura 70: Pregos ao arranque b)

Os pregos submetidos ao arranque apresentam algumas limitações, como referido anteriormente, tais como a não consideração da resistência de pregos aplicados no topo para pregagens perpendiculares ou mesmo inclinadas em relação ao fio da madeira.

Para a pregagem perpendicular ou oblíqua o eurocódigo define valores resultantes de cálculo, como por exemplo o menor valor característico, presentes na seguinte fórmula.

Para pregos lisos:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{ax,k} d t + f_{head,k} d_h^2 \end{array} \right. \quad (156)$$

Para outros tipos examinados na EN14592:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{array} \right. \quad (157)$$

Onde:

- d é o diâmetro do prego expressa mm
- t_{pen} é o comprimento de penetração da peça que recebe a ponta ou o comprimento da parte roscada inserida nessa peça
- t é a espessura da peça de ancoragem da cabeça
- d_h é o diâmetro da cabeça do prego
- f_{ax,k} é o valor característico da resistência ao arranque da ponta
- f_{head,k} é o valor característico da resistência ao punçoamento do material sob a cabeça

Para a determinação do comprimento t_{pen}, deve proceder-se ao cálculo ilustrado na seguinte figura, estando este relacionada com o tipo de pregagem, isto é, se a pregagem é perpendicular ou se a pregagem é oblíqua.

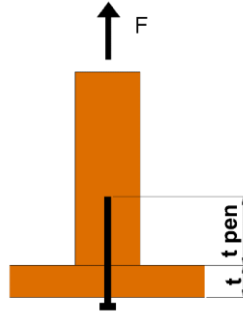


Figura 71: Comprimento de penetração a)

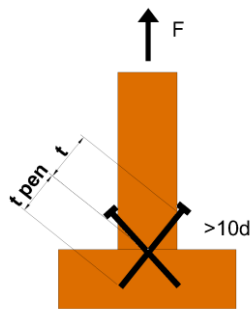


Figura 72: Comprimento de penetração b)

As resistências $f_{ax,k}$ e $f_{head,k}$ para pregos lisos em que a penetração é inferior a $12d$ na peça que recebe a ponta deve ser calculado recorrendo a seguinte fórmula.

Resistência $f_{ax,k}$ para pregos lisos:

$$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho k^2 \quad (158)$$

Resistência f_{head} para pregos lisos:

$$f_{head} = 70 \times 10^{-6} \rho k^2 \quad (159)$$

Em que:

- ρk é o valor característico da massa volúmica da madeira

segundo a metodologia utilizada no eurocódigo devem ser calculadas $f_{ax,k}$ e f_{head} recorrendo a EN1382[16], EN1382[17], e EN14358[25].

9.1.3. Interação corte e arranque

Para a verificação de pregos lisos submetidos simultaneamente a esforço de corte e de arranque deve ser utilizada na fórmula:

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} \leq 1 \quad (160)$$

Para outro tipos de prego definidos na EN14592[28] deve ser utilizada na próxima equação:

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (161)$$

9.2. Teoria de Johansen

A teoria de Johansen está presente no EC5-1-1; serve para dimensionar pregos, agrafos e parafusos de enroscar, entre outros elementos submetidos a esforço de corte; este método determina o equilíbrio para as ligações madeira-madeira, madeira-aço, madeira-derivados. Para este método pressupõem-se que os materiais têm comportamento rígido-plástico.

9.3. Modos de rotura

Para os ligadores em corte duplo ou múltiplo os valores obtidos pelas expressões descritas no eurocódigo obtêm a resistência por plano de corte; deste modo para obter a resistência total por ligador esses valores devem ser multiplicados pelo número de planos de corte.

Cada lado da superfície vai estar submetido a pressões de contacto de sentidos opostos pelo facto dos planos de corte coincidirem com as superfícies de contacto das peças como podemos constatar na seguinte figura.

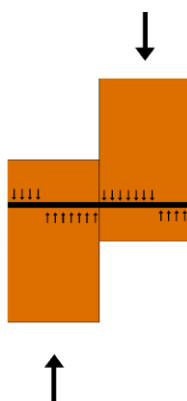


Figura 73: Pressões de contato

As condições de corte simples assim como duplo ou múltiplo são referentes ao tipo de ligador sendo que também é relevante o número de planos intersectados, como é possível verificar na seguinte figura:

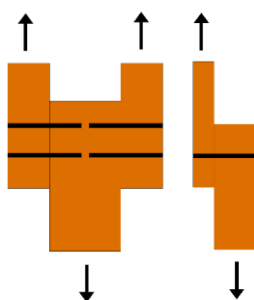


Figura 74: Ligações simples e dupla

Na figura anterior podemos constatar que cada ligador somente intersecta um plano; apesar de ser mais característica para ligações pregadas e com parafusos de enroscar, também pode ocorrer para outro tipo de ligações.

Na ilustração que se segue é possível verificar que cada ligador (geralmente são cavilhas ou parafusos de porca) intersecta dois planos; este tipo de ligação pode ser mais frequentemente observada nas ligações perna-linha ou viga-coluna

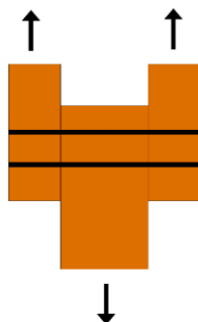


Figura 75: Ligações por cavilha (viga coluna)

O mecanismo de rotura pode assumir diversas formas dependendo das características mecânicas assim como das características geométricas do elemento interveniente na ligação; estes mecanismos são designados por módulos de rotura e envolvem o esmagamento da madeira conjuntamente ou não com a formação de rótulas plásticas no ligador. Deste modo, deve ser feita a verificação da resistência para os vários modos de rotura da ligação, sendo esta a menor resistência entre elas.

Os diferentes modos de rotura são nomeados de modo de rotura de tipo 1, 2 e 3, sendo que para o modo de rotura de tipo 1 há esmagamento da madeira contudo sem que haja plastificação do ligador. No modo de rotura do tipo 2, para além do esmagamento da madeira, há simultaneamente formação de rótula plástica; por último no modo de rotura do tipo 3 há a formação de 2 rótulas plásticas.

9.4. Corte simples

9.4.1. Ligações madeira-madeira e derivados

Os parâmetros para a ligação madeira-madeira em corte simples podem ser constatados na seguinte figura:

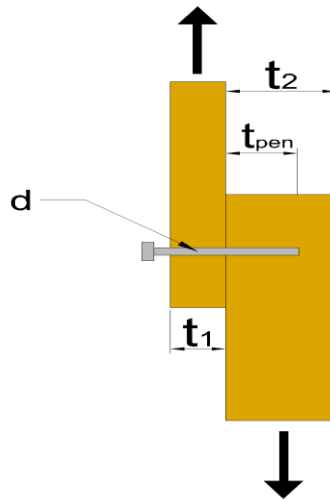


Figura 76: Parâmetros da ligação simples

Em que:

- t_1 e t_2 são as espessuras das pelas de madeira a ligar
- d é o diâmetro do ligador
- $f_{h,1,k}$ é o valor característico da resistência ao esmagamento localizado para a madeira da peça 1
- $f_{h,2,k}$ é o valor característico da resistência ao esmagamento localizado para a madeira da peça 2
- M_y, R_k é o valor característico do momento plástico do ligador
- β é o rácio $\frac{f_{h,1,k}}{f_{h,2,k}}$ sendo este igual a 1 caso a madeira seja do mesmo tipo

9.4.1.1. Modo de rotura do tipo 1A

Este modo de rotura é caracterizado pelo total esmagamento, devido às forças de compressão na peça, atuando no mesmo lado do ligador e sendo limitada pelo menor valor das seguintes fórmulas:

Modo de rotura do tipo 1A1 madeira-madeira ligações simples:

$$F_{v,Rk,1A1} = f_{h,1,k} t_1 d \quad (162)$$

Modo de rotura do tipo 1A2 madeira-madeira ligação simples:

$$F_{v,Rk,1A2} = f_{h,2,k} t_2 d \quad (163)$$

Para o caso dos dois materiais serem do mesmo tipo a resistência ao esmagamento localizado será igual; deste modo deve prevalecer o valor correspondente à peça de menor espessura; nas seguintes figuras podemos verificar a distribuição das tensões de contacto sendo definida pelas áreas a cinzento e as áreas a branco correspondendo ao vazio produzido pelo escorregamento relativo entre as peças.

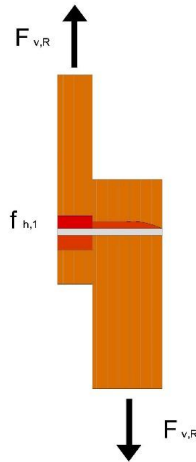


Figura 77: Modo de rotura do tipo 1A1 madeira-madeira ligação simples

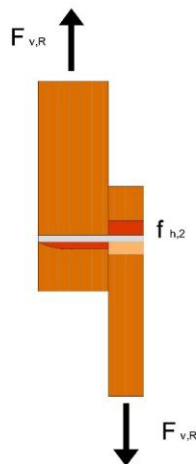


Figura 78: Modo de rotura do tipo 1A2 madeira-madeira ligação simples

9.4.1.2. Modo de rotura do tipo 1B

Este módulo de rotura é caracterizado pelo esmagamento da madeira no lado oposto do ligador promovendo deste modo a rotação e o deslizamento relativo de ambas as peças, como podemos constatar na seguinte figura.

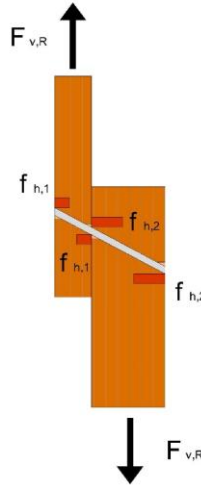


Figura 79: Modo de rotura do tipo 1B madeira-madeira ligação simples

É possível obter o valor da resistência para este módulo na equação que se segue.

$$F_{v,Rk,1B,1} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left(\sqrt{\beta + 2\beta^2(1 + \alpha + \alpha^2) + \beta^3 \alpha^2} \right) - \beta(1 + \alpha) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (164)$$

Onde:

- $\alpha = t_2/t_1$
- $F_{ax,Rk}$ é o valor característico da resistência ao arranque do ligador

O primeiro termo corresponde à parcela do modelo de Johansen e a segunda parcela corresponde ao efeito *rope effect*, terminologia anglo-saxónica utilizada para designar o efeito das bielas quando há uma rotação do ligador.

É relevante ter em atenção que para ligadores ao corte simples tais como pregos e parafusos de enroscar a resistência ao arranque pode estar relacionada com o lado considerado da ligação; assim deve ser considerado o menor dos valores.

O EC5-1-1 limita as contribuições provenientes da teoria de Johansen aos seguintes valores.

Tabela 12: Limitação da teoria de Johansen

Pregos redondos lisos	15%
Pregos quadrados lisos	25%
Outros tipos de pregos	50%
Parafusos de enroscar	100%
Parafusos de porca	25%
Cavilhas	0%

9.4.1.3. Modo de rotura do tipo 2

Neste modo de rotura há simultaneamente esmagamento da madeira assim como a formação de rótula plástica no ligador, consequentemente há deslizamento relativo das peças.

A primeira possibilidade está representada na seguinte figura:

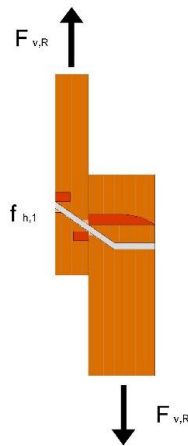


Figura 80: Modo de rotura do tipo 2A madeira-madeira ligação simples

$$F_{v,Rk,2A} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left(\left(\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (165)$$

A segunda possibilidade está representada na ilustração que se segue:

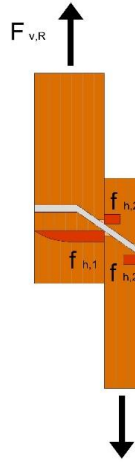


Figura 81: Modo de rotura do tipo 2B madeira-madeira ligação simples

$$F_{v,Rk,2B} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left(\left(\sqrt{2\beta^2 (1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_2^2 d}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (166)$$

9.4.1.4. Modo de rotura do tipo 3

Este modo de rotura, representado na figura seguinte, é caracterizado pela formação de duas rótulas plásticas, uma em cada peça de madeira e é representado pela seguinte expressão.

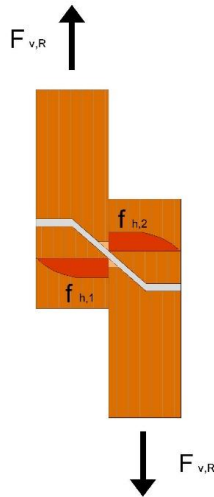


Figura 82: Modo de rotura do tipo 3 madeira-madeira ligação simples

$$F_{v,Rk,2B} = 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d \frac{2\beta}{1 + \beta}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (167)$$

9.4.2. Ligações madeira-aço

Para a aplicação da teoria de Johansen nas ligações madeira-aço devem ser tidos em contas os seguinte pressupostos:

As chapas finas não restringem a rotação do ligador na secção do furo enquanto que as chapas finas conseguem restringir essa rotação na secção do furo.

Há a exigência de ser verificada a segurança das chapas visto que há possibilidade, no caso das chapas finas, de ocorrer o esmagamento, sendo que esta verificação constitui a verificação ao esmagamento diametral no furo.

Considera-se a chapa fina quando a sua espessura for inferior a metade do diâmetro do ligador; caso contrário pode ser considerada chapa espessa, sendo que para ser válida a folga do furo não poderá ser superior a $0,1d$, representando d o diâmetro.

9.4.2.1. Modo de rotura do tipo 1 (chapa fina)

Este modo de rotura pode ser observado na seguinte figura, sendo que é exclusiva para chapas finas por permitir a rotação do ligador na secção do furo.

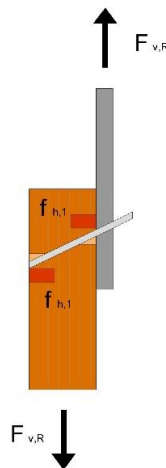


Figura 83: Modo de rotura do tipo 1 chapa fina ligação simples

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é dada por:

$$F_{v,Rk,1F} = 0,4 f_{h,k} t_1 d \quad (168)$$

- $f_{h,k}$ e t_1 correspondem às características da única peça de madeira

9.4.2.2. Modo de rotura do tipo 1 (chapa espessa)

Este modo de rotura pode ser observado na seguinte figura, sendo que é exclusiva para chapas espessas, onde a rotura é originada pelo esmagamento uniforme da madeira. O ligador permanece na chapa sendo que não há formação de rótulas plásticas

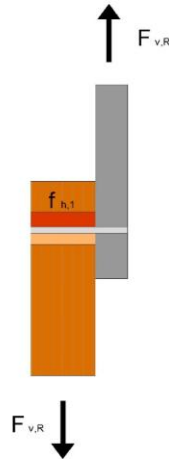


Figura 84: Modo de rotura do tipo 1 chapa espessa ligação simples

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é expressa por:

$$F_{v,Rk,1F} = f_{h,k} t_1 d \quad (169)$$

9.4.2.3. Modo de rotura do tipo 2 (chapa fina)

A presença simultânea de formação de rótula plástica e rotação no ligador na secção do furo provoca este tipo de rotura, que é dada pela seguinte expressão e que podemos constatar na seguinte figura:

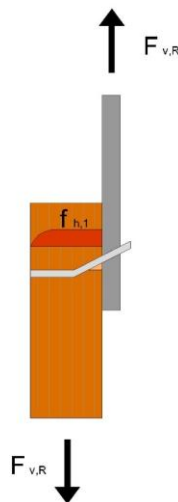


Figura 85: Modo de rotura do tipo 2 chapa fina ligação simples

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é expressa por:

$$F_{v,Rk,2B} = 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (170)$$

9.4.2.4. Modo de rotura do tipo 2 (chapa espessa)

Na próxima figura a interface do ligador desenvolve uma rótula plástica e conjuntamente com o esmagamento produzido na madeira, há rotação da mesma: a expressão que traduz este comportamento está expressa seguidamente:

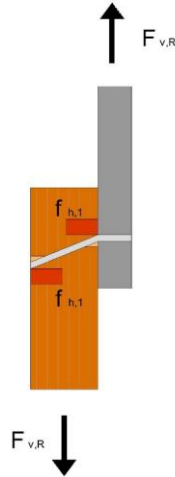


Figura 86: Modo de rotura do tipo 2 chapa espessa ligação simples

Na fórmula que se segue é calcular este modo de rotura 2 :

$$F_{v,Rk,2B} = f_{h,1,k} t_1 d \left(\left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} \right) - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (171)$$

9.4.2.5. Modo de rotura do tipo 3 (chapa espessa)

Este modo de rotura somente existente nas chapas espessas; pode ser visualizada na seguinte figura, onde há a formação de duas rótulas plásticas na seção madeira-aço e num ponto no interior da peça em simultânea com o esmagamento da madeira. A expressão que define este comportamento será descrita em seguida:

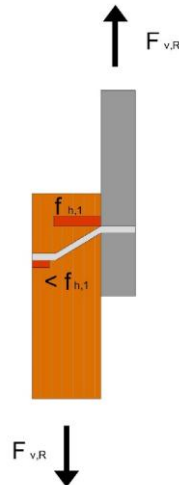


Figura 87: Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa ligação simples

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é dada por:

$$F_{v,Rk,2B} = 2,3\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (172)$$

9.1. Corte duplo

Este tipo de ligação é caracterizado pela simetria do ponto de vista geométrico assim como da material utilizada, sendo que o eixo de simetria é coincidente com o plano médio do material.

As ligações podem ser estabelecidas em madeira e derivados da madeira assim como em aço. Os modos de rotura são definidos recorrendo as expressões de Johansen dependendo dessa ligação. É relevante ter em conta que as expressões correspondem aos valores característicos da resistência ao plano de corte sendo que devem ser multiplicadas por dois para se obter a resistência do ligador.

9.1.1. Ligações madeira-madeira e derivados

Na seguinte figura podemos verificar o exemplo deste tipo de ligação.

As expressões utilizadas têm o mesmo significada que as utilizadas para o corte simples.

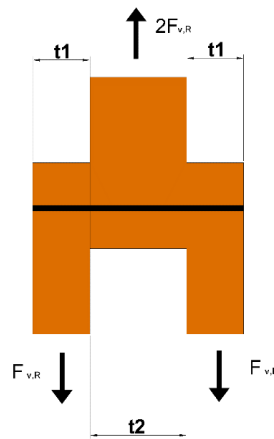


Figura 88: Parâmetros da ligação dupla

9.1.1.1. Modo de rotura do tipo 1A

Existem dois modos de rotura para este tipo de ligação como podemos verificar na seguinte figura, sendo que as terminologias são equivalentes para as do corte simples. Estes dois modos correspondem ao esmagamento das barras laterais ou da central; as expressões que caracterizam este tipo de rotura estão descritas seguidamente.

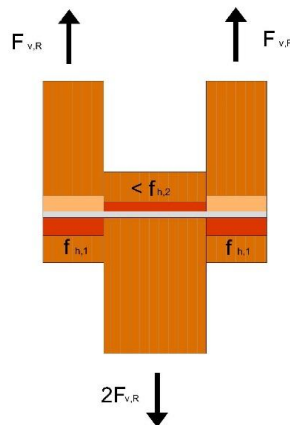


Figura 89: Modo de rotura do tipo 1A1 madeira-madeira ligação dupla

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é descrita posteriormente:

$$F_{v,Rk,1A1} = f_{h,k} t_1 \quad (173)$$

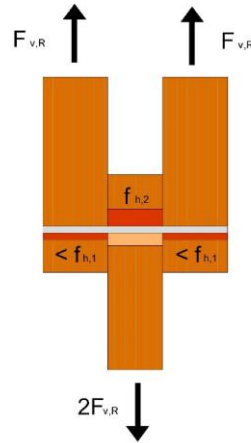


Figura 90: Modo de rotura do tipo 1A2 madeira-madeira ligação dupla

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é expressa por:

$$F_{v,Rk,1A2} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (174)$$

9.1.1.2. Modo de rotura do tipo 2

Neste modo de rotura há ocorrência da formação de duas rótulas plásticas no plano médio, como podemos verificar na seguinte figura pode ocorrer a convergência das duas rótulas num único ponto. A expressão que traduz este comportamento será descrita seguidamente.

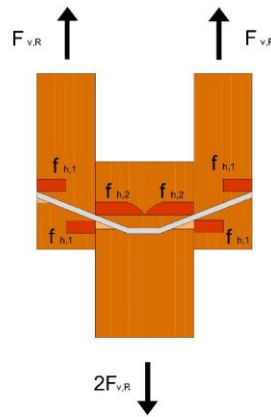


Figura 91: Modo de rotura do tipo 2 madeira-madeira ligação dupla

Na fórmula 176 é possível calcular o modo de rotura 2 madeira-madeira ligação dupla:

$$F_{v,Rk,2B} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left(\left(\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (175)$$

9.1.1.3. Modo de rotura do tipo 3

Neste tipo de modo de rotura há formação de quatro rótulas plásticas, duas no plano central e as outras duas simétricas no plano lateral; como no modo de rotura do tipo 2, pode haver convergência do ponto central, como podemos constatar na figura seguinte assim como na expressão que as caracteriza:

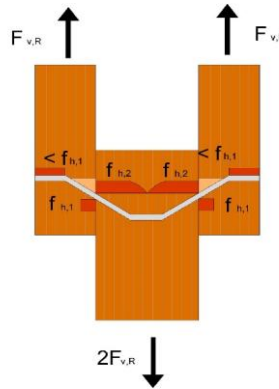


Figura 92: Modo de rotura do tipo 3 madeira-madeira ligação dupla

A fórmula que permite calcular este modo de rotura é dada por:

$$F_{v,Rk,3A} = 1,05 \sqrt{\frac{4\beta}{1+\beta}} M_{y,Rk} f_{h,1,k} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (176)$$

9.1.2. Ligações madeira-aço (chapas laterais)

Para este tipo de rotura devem ser considerados os mesmos pressupostos definidos anteriormente. A espessura da peça central é denominada por t_2 . Estes valores são referentes à resistência ao plano de corte sendo que para obter a resistência do ligador devem ser multiplicados por dois.

9.1.2.1. Modo de rotura do tipo 1 (qualquer chapa)

Neste tipo de rotura ocorre o esmagamento uniforme da peça de madeira sem formação de rótula plástica, como podemos observar na seguinte figura:

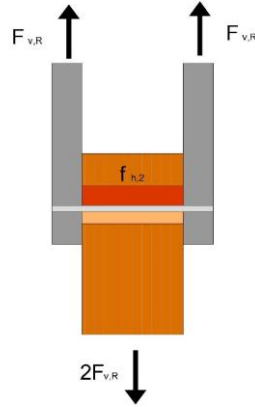


Figura 93: Modo de rotura do tipo 1 qualquer chapa (lateral) ligação dupla

A expressão que traduz este comportamento está descrita na seguinte equação:

$$F_{v,Rk,1} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (177)$$

9.1.2.2. Modo de rotura do tipo 2 chapa fina

Neste tipo de rotura há formação de duas rótulas plásticas na secção central, sendo que eventualmente as rótulas podem ser conjugadas em apenas uma; simultaneamente há o esmagamento da madeira. A seguinte figura ilustra este comportamento:

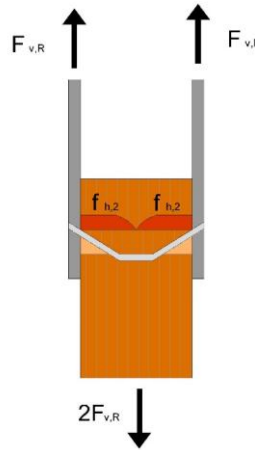


Figura 94: Modo de rotura do tipo 2 chapa fina (lateral) ligação dupla

A expressão que traduz este comportamento esta expressa por:

$$F_{v,Rk,3A} = 1,63 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k}} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (178)$$

9.1.2.3. Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa

Este modo de rotura é semelhante ao anterior sendo que neste caso há possibilidade de rotação do ligador devido à plastificação das secções da interface.

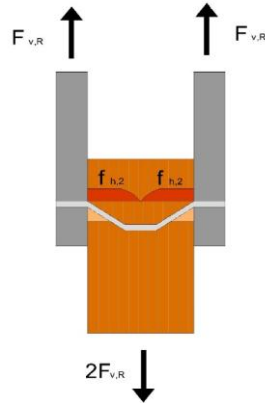


Figura 95: Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa (lateral) ligação dupla

Na expressão que traduz este vem que:

$$F_{v,Rk,3A} = 2,30\sqrt{M_{y,Rk}f_{h,2,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (179)$$

9.1.3. Ligações madeira-aço (chapa central)

Para este tipo de ligação é possível a ocorrência de vários tipos de modos de rotura independentemente da espessura da chapa.

9.1.3.1. Modo de rotura do tipo 1

Nesta rotura ocorre o esmagamento da madeira, sendo que t_1 representa a espessura desse elemento, como podemos constatar na seguinte figura e expressão:

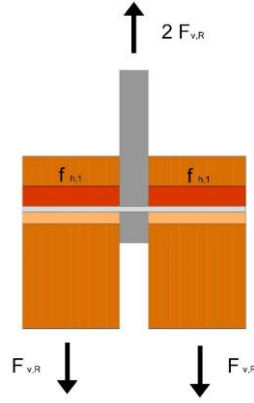


Figura 96: Modo de rotura do tipo 1 chapa espessa (central) ligação dupla

A expressão que traduz este comportamento está expressa por:

$$F_{v,Rk,1A1} = f_{h,k} t_1 d \quad (180)$$

9.1.3.2. Modo de rotura do tipo 2

Este tipo de rotura é caracterizada pela formação de rótula plástica central ou duas rótulas nas interfaces madeira-chapa e consequentemente há rotação do ligador e deslizamento relativo da chapa e das duas peças em madeira, como podemos verificar na seguinte figura:

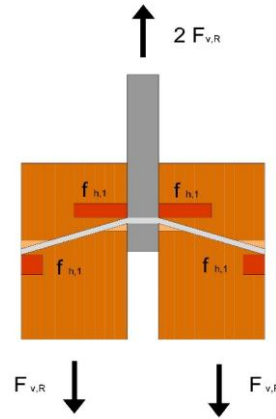


Figura 97: Modo de rotura do tipo 2 chapa espessa (central) ligação dupla

A expressão que traduz este comportamento está descrita posteriormente:

$$F_{v,Rk,1} = f_{h,1,k} t_1 d \left(\left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} \right) - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (181)$$

9.1.3.3. Modo de rotura do tipo 3

Este tipo de rotura sucede na presença de uma ou duas rótulas plásticas centrais ou laterais dependendo da espessura das chapas, como podemos constatar na ilustração que se segue.

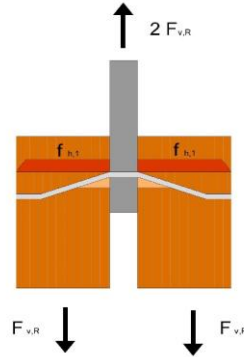


Figura 98: Modo de rotura do tipo 3 chapa espessa (central) ligação dupla

A expressão que traduz este comportamento esta expressa por:

$$F_{v,Rk,1} = 2,30 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (182)$$

9.1.4. Exercício de aplicação ligações pregadas

Determine o número de pregos necessários para garantir a estabilidade de uma ligação pregada simples madeira-madeira solicitada com 6 kN, indicando qual o modo de rotura limitante. Os elementos são em madeira novo folhosa D40 com 45 cm de espessura cada. Considere o fator de modificação 0,8 e o coeficiente parcial de segurança 1,3. Os pregos são introduzidos sem pré-furação e são produzidos com arame de 600 N/mm de pescoço redondo de 6 mm e 60 cm de comprimento.

9.1.4.1. Resolução manual

Resistência ao esmagamento localizado:

$$f_{h,2,k} = f_{h,1,k} 0,082 \rho_k d^{-0,3} = 28,26 \text{ N/mm}^2 \quad (183)$$

Momento de cedência plástica do prego:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_u d^{2,6} = 18987 \text{ Nmm} \quad (184)$$

Modo de rotura do tipo 1A:

$$F_{v,Rk,1A1} = F_{v,Rk,1A2} = f_{h,1,k} t_1 d = 7631 \text{ N} \quad (185)$$

Resistência ao arranque:

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} dt_{pen} = 626,6 \text{ N} \\ f_{ax,k} dt + f_{hsad,k} d^2_h = 5388,6 \text{ N} \end{array} \right. \quad (186)$$

Modo de rotura do tipo 1B:

$$F_{v,Rk,1B,1} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left(\sqrt{\beta + 2\beta^2(1 + \alpha + \alpha^2) + \beta^3 \alpha^2} \right) - \beta(1 + \alpha) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 3317,5 \text{ N} \quad (187)$$

Modo de rotura do tipo 2A:

$$F_{v,Rk,2A} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left(\left(\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_1^2 d}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 3256 \text{ N} \quad (188)$$

Modo de rotura do tipo 2B:

$$F_{v,Rk,2B} = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left(\left(\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} t_2^2 d}} \right) - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 3253 \text{ N} \quad (189)$$

Modo de rotura do tipo 3:

$$F_{v,Rk,2B} = 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d \frac{2\beta}{1 + \beta}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} = 3074 \text{ N} \quad (190)$$

9.1.4.2. Resolução utilizando o programa XDTimber

The screenshot shows the 'Ligação pregada' window in the XDTimber software. The 'Dados' section is active, displaying input fields for material properties and joint dimensions. The 'Corte simples' tab is selected.

Dados (1.0)

Características da madeira de ancoragem (1.1)

Kmod: 0,8

Ligações: 1,3 mm

pk: 590 kg/m³

pmean: 700 kg/m³

Características da madeira que recebe a ponta do prego (1.2)

pk: 590 kg/m³

pmean: 700 kg/m³

Cálculo do momento - Pregos redondos (2.0)

My,Rk: 18987,4112 Nmm

Características do prego (1.3)

d: 6 mm

comprimento: 60 mm

fu: 600 kg/m²

Tipo de aplicação (1.4)

☒ Sem pré-furação

☐ com pré-furação

fh,1,k: 28,2631 N/mm²

fh,2,k: 28,2631 N/mm²

Ligações em corte simples (3.0)

t1: 45 mm

t2: 45 mm

tper: 15 mm

β: 1

α: 1

Propriedades

☒ Pk ☐ Pmean

Informação

Timber structures
thesis: Amaury Silva
mentor: Dr Paulo Cachim

Figura 99: Exercício de ligações pregadas (dados) utilizando o programa “XDTimber”

The screenshot shows the 'Ligação pregada' window in the XDTimber software. The 'Dados' section is active, displaying input fields for material properties and joint dimensions. The 'Corte simples' tab is selected.

Modos de rotura do tipo 1 (4.0)

Rotura do tipo 1A (4.1)

Cálculo do tipo 1A

Fv,Rk,1A1: 7631,037 N

Fv,Rk,1A2: 7631,037 N

Rotura do tipo 1B (4.2)

dh: 12 mm

Fax,Rk: 626,58 N

Fv,Rk,1B: 3317,52 N

Modos de rotura do tipo 2 (5.0)

Rotura do tipo 2A (5.1)

Fv,Rk,2A: 3253,557 N

Rotura do tipo 2B (5.2)

Fv,Rk,2B: 3253,557 N

Modo de rotura do tipo 3A

Fv,Rk,3: 3074,9538 N

Valor de cálculo (7.0)

Rotura limitante (7.1)

Fv,Rk: 3074,9538 N

Resistência de cálculo (7.2)

Rd: 1892,2793 N

Propriedades

☒ Pk ☐ Pmean

Informação

Timber structures
thesis: Amaury Silva
mentor: Dr Paulo Cachim

Figura 100: Exercício de ligações pregadas utilizando o programa “XDTimber”

Em anexo encontra-se o PDF de resultados gerado pelo programa XDTimber **Error! Reference source not found.**

Capítulo 10

Considerações Finais

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

10.1. Conclusões

Ao longo da presente dissertação é possível constatar que a utilização da madeira como elemento principal da estrutura nas construções, não só é possível mas, também tem muitos benefícios tanto económicos como ambientais.

Entre os diversos tipos de solicitações possíveis, para o âmbito deste trabalho foram desenvolvidos e tratados separadamente os esforços, tais como tração, compressão, flexão, corte e torção e ainda ações nas vigas curvas, pilares e nas ligações pregadas. Vale a pena salientar que um bom projeto é determinante para poder reduzir o custo das obras. No caso das construções em madeira, a orientação das seções das lamelas tem uma grande relevância na resistência e consequentemente na dimensão final da peça.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação culminou na criação de uma aplicação de cálculo que visa a verificação da segurança de peças estruturais em madeira à temperatura ambiente, nas solicitações enunciadas anteriormente, designado “XDTimber”. Este programa apresenta uma interface inicial dinâmica e visualmente apelativa onde o utilizador pode optar pelo tipo de cálculo que pretende realizar; para cada um dos diferentes tipos de cálculo existe uma opção adicional que permite aceder a um PDF com exercícios exemplificativos resolvidos manualmente e recorrendo ao programa XDTimber.

Sendo o XDTimber destinado tanto a projetistas de estruturas como a estudantes de engenharia, o programa oferece uma panóplia de ferramentas e funcionalidades que permitem apoiar o utilizador e tornar os cálculos mais expeditos. Como exemplo, temos o facto de ter sido incorporada uma base de dados no XDTimber facilmente acessível que contém diversas propriedades relevantes para o cálculo estrutural de diversos tipos de madeira e na qual é possível escolher os dados necessários; outras funcionalidades tais como uma pequena calculadora, o “auto save”, “save” e “load” que permitem gravar e recomeçar o trabalho no ponto finalizado em qualquer altura. Este programa disponibiliza a possibilidade de o utilizador considerar uma tolerância ou não nos resultados, “afetando” o valor da capacidade resistente do elemento; contudo, é uma decisão de cada utilizador adotar ou não esta opção. Também existe a possibilidade de gerar os resultados em PDF sendo que assim é possível imprimir os resultados ou simplesmente enviá-los por correio eletrónico.

Os resultados do programa desenvolvido XDTimber foram comprovados através da resolução manual de exercícios e também por uma folha de Excel desenvolvida em paralelo com o programa.

É relevante referir algumas das limitações do programa XDTimber, tais como o facto de não trabalhar em situações de incêndio. O facto de não ser possível trabalhar com forças com ângulos diferentes de 0 e 90 graus como por exemplo na tração e compressão e o facto de não ser possível trabalhar com outros tipos de geometrias tais como as circulares também é uma das limitações do XDTimber.

Em suma, é possível afirmar que os objetivos propostos no âmbito desta dissertação foram cumpridos na íntegra sendo que há espaço para melhorias e futuros desenvolvimentos que serão posteriormente apresentados.

10.2. Desenvolvimentos futuros

É absolutamente fundamental continuar a aposta na madeira como elemento válido e viável para a construção de edificações assim é imperativo que continuem a surgir programas que permitam ajudar o projetista a optar por soluções cada vez mais económicas mas respeitando sempre as normas em vigor. Existem funcionalidades que podem ser desenvolvidas num futuro programa, tais como:

- Cálculo de outros tipos de ligações tais como cavilhas e parafusos de porca;
- Cálculo de seções com outros tipos de geometria, tais como geometrias circulares;
- Cálculo da resistência da madeira quando está submetido à ação do fogo;
- Incorporação de uma maior diversidade de tipos de madeira, assim como das suas propriedades mecânicas mais relevantes para o dimensionamento;
- Implementação de preços praticados na venda da madeira para que assim fosse possível fazer uma primeira estimativa dos custos;
- Possibilidade da escolha de uma língua estrangeira, abrangendo assim um maior número de potenciais utilizadores;

Para um futuro programa seria uma mais-valia haver a possibilidade de visualizar os esforços atuantes, assim como as dimensões do elemento incorporados no programa.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEN, EN 14374:2004, Timber structures - Structural laminated Veneer lumber - Requirements

CEN, EN 1991-1-6:2002, Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1.6 - Actions during execution

CEN, EN 1995-1-1:2014/AC:2006, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings (2004).

Almeida, F. A. L. d. (2012). *A madeira como material estrutural - projeto da estrutura da cobertura de um edifício*. (Mestrado), Universidade do Porto.

Cachim, P. (2014). *Construção em madeira - A madeira como material de construção*: Publindústria.

Carvalho, A. d. (2010). *Práticas de C# Algoritmia e Programação Estruturada*: Lidel - edições técnicas, lda.

Hilyard, J. (2006). *C# Cookbook, Second Edition*: Publindústria.

Maia, É. F. G. d. (2013). *Programa para o dimensionamento ao fogo de vigas mistas aço-betão*. (Mestrado), Universidade de Aveiro.

Meneses, F. M. d. R. (2012). *Desenvolvimento de programa para o cálculo de pilares de betão armado*. (Mestrado), Universidade de Aveiro.

Negrão, J.; Faria, A. (2009). *Projecto de Estruturas de Madeira*: Publindústria, Edições Técnicas.

Ozelton, E. C. (1939). *Timber Designers' Manual*.

Microsoft. Visual C#. from <https://msdn.microsoft.com/en-us/vstudio/hh341490.aspx>

12. ANEXOS



TRACAO

Propriedades:	Valores:	Unidades:
y	120	mm
z	120	mm
Nsd	60	kN
Kmod	0,6	-----
α_m	1,3	-----
$f_{t,0,k}$	10	N/mm ²
kh	1,05	-----
$f'_{t,0,d}$	4,85	N/mm ²
σ_{sd}	4,17	N/mm ²

Tolerância	0	%
Verificação		Verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:25:44

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 1: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício tração)



COMPRESSAO

Propriedades:	Valores:	Unidades:
y	120	mm
Nsd	90	kN
l	200	mm
Exterior	30	mm
Interior	30	mm
Kmod	0,7	-----
γ_m	1,25	-----
$f_{c,90,d}$	1,85	N/mm ²
$\Delta_{l,ext}$	30,0	mm
$\Delta_{l,int}$	30,0	mm
L_{ef}	260	mm
$\sigma_{c,90,d}$	2,88	N/mm ²
Características da madeira	1,75	-----

Tolerância	0	%
Verificação	3,24	Verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:25:15

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 2: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício compressão)



FLEXAO

Propriedades:	Valores:	Unidades:
y	100	mm
z	250	mm
l	5	m
q	4	kN/m
Kmod	0,6	-----
γ_m	1,3	-----
f _{m,k}	50	N/mm ²
E _{0,05}	14000	N/mm ²
k _{sys}	1	-----
k _h	1	-----
f _{m,d}	23,08	N/mm ²
m	0,9	-----
L _{ef}	5000	mm
M _{sd}	12,5	kNm
$\sigma_{m,d}$	12	N/mm ²
$\sigma_{m,crit}$	87,36	N/mm ²
$\lambda_{rel,m}$,76	-----
k _{crit}	,99	-----
Tolerância	0	%
Verificação	22,849	Verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:26:29

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 3: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício flexão)



CORTE

Propriedades:	Valores:	Unidades:
y	100	mm
z	200	mm
Kmod	0,8	-----
N/mm ²	1,3	-----
f _{v,k}	3,8	N/mm ²
F _{v,g,d}	2,34	N/mm ²
V _{sd}	15000	N
TVD	1,13	N/mm ²
T	1000000	Nmm
α	0,208	-----
t _{Tor,d}	2,4	N/mm ²

Tolerância	0	%
Verificação	1,26	Não verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:22:03

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 4: Impressão de resultados do programa “XDTimber” (Exercício corte e torção)



ENTALHE

Propriedades:	Valores:	Unidades:
y	150	mm
z	250	mm
L	4	m
Qsd	7	kN/m
y'	150	mm
z'	150	mm
b	100	m
Kmod	0,6	-----
γ_m	1,25	-----
$f_{v,k}$	2,7	N/mm ²
$f_{v,g,d}$	1,3	N/mm ²
$F_{v,d}$	13,65	kN
$t_{v,d}$,91	N/mm ²
l	0	-----
α	0,6	-----
x	0,05	mm
kn	6,5	-----
kv	,84	-----

Tolerância	0	%
Verificação	1,092	verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:24:47

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 5: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício Viga com entalhe)



PILARES

Propriedades:	Valores:	Unidades:
y	300	mm
z	250	mm
h	8	m
Nsd	150	kN
Gsd,y	5	kN/m
Gsd,z	5	kN/m
Km	0,7	-----
Bc	0,1	-----
Kmod	0,8	-----
r_m	1,25	-----
E0.05	13700	N/mm ²
f _{m,k}	32	N/mm ²
f _{c,0k}	29	N/mm ²
Área	75000	mm ²
$\sigma_{c,0,d}$	2	N/mm ²
Msd,y	26,7	kNm
Msd,z	26,7	kNm
L _{v,y}	4	m
L _{v,z}	4	m
λ_y	55,4	-----
λ_z	46,2	-----
$\lambda_{rel,y}$,811	-----
$\lambda_{rel,z}$,677	-----
K _y	,85	-----
K _z	,75	-----
K _{c,y}	,91	-----
K _{c,z}	,93	-----
Tolerância	0	%
Verificação	,776	Verifica
Verificação	,753	Verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:26:56

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 6: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício pilares e encurvadura)



VIGAS

Propriedades:	Valores:	Unidades:
Qsd	3	kN/m
L	15	m
r int	40	m
$\alpha \square \square$	0	°
h $\square \square$	2	m
b	0,4	m
t	0,03	m
\square	20	°
Kmod	0,9	-----
γ_m	1,25	-----
fc,90,g,k	0,45	N/mm^2
fm,g,k	28	N/mm^2
fc,90,g,d	,32	N/mm^2
fm,g,d	20,16	N/mm^2
Map,d	84,38	kNm
r	41	m
kl	1,02	-----
$\sigma_{m,d}$,32	N/mm^2
kr	1	-----
Verificação no cume	20,16	Verifica
k dis	1,7	-----
k vol	,244	-----
kp	,012	-----
$\sigma_{t,90,d}$,004	N/mm^2
Tolerância	0	%
Verificação	,13	Verifica

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 14-01-2016 11:27:30

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 7: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício vigas curvas)



LIGACOES

Corte Simples: Madeira-Madeira e Derivados

Propriedades:	Valores:	Unidades:
Kmod	0,8	-----
γ_m	1,3	-----
ρ_k	590	kg/m ³
ρ_{mean}	700	kg/m ³
ρ_k	590	mm
ρ_{mean}	700	kg/m ³
d	6	mm
comprimento	60	mm
f_u	600	kg/m ²
$f_{h,1,k}$	28,2631	N/mm ²
$f_{h,2,k}$	28,2631	N/mm ²
M_y, R_k	18987,4112	Nmm
t1	45	mm
t2	45	mm
t _{pen}	15	mm
β	1	-----
α	1	-----
F _{v,Rk,1A1}	7631,037	N
F _{v,Rk,1A2}	7631,037	N
F _{v,Rk,1B}	3317,52	N
F _{v,Rk,2A}	3253,557	N
F _{v,Rk,2B}	3253,557	N
F _{v,Rk,3}	3074,9538	N
R _d	1892,2793	N

Dimensionado por :

Tese: Amaury Silva

Date: 15-11-2015 18:11:20

Orientador: Paulo Cachim

Figura A 8: Impressão de resultados do programa "XDTimber" (Exercício ligações pregadas)